

AUS DEM MEDIZINISCHEN ZENTRUM FÜR ZAHN-, MUND- UND
KIEFERHEILKUNDE

(Geschäftsführender Direktor: Prof. Dr. Dr. A. Neff)

- ABTEILUNG FÜR ZAHNERHALTUNG -

(Direktor: Prof. Dr. R. Frankenberger)

des Fachbereichs Medizin der Philipps-Universität Marburg

in Zusammenarbeit mit dem Universitätsklinikum Gießen und Marburg GmbH,
Standort Marburg

**Messgenauigkeit und Linearität der Messkurven
verschiedener Endometriegeräte im nahen
Apexbereich.**

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades der gesamten Humanmedizin

dem Fachbereich Medizin

der Philipps-Universität Marburg

vorgelegt

von

Beata Urban-Klein

aus Stargard

Marburg 2010

Angenommen vom Fachbereich Medizin
der Philipps-Universität Marburg
am: 6. Dezember 2010

Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereichs

Dekan:	Prof. Dr. M. Rothmund
Referent:	Prof. Dr. R. Frankenberger
Korreferent:	Prof. Dr. M. Gente

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Problemstellung	5
2 Literatur.....	7
2.1 Ablauf der endodontischen Behandlung	8
2.2 Die Arbeitslänge in der Endodontie	9
2.2.1 Definition und Bedeutung der Arbeitslänge.....	9
2.2.2 Anatomie der apikalen Region	11
2.3 Die röntgenologische Bestimmung der Arbeitslänge	12
2.4 Die endometrische Bestimmung der Arbeitslänge.....	16
2.4.1 Historische Entwicklung	17
2.4.1.1 Grundlagen und Geräte der ersten Generation.....	17
2.4.1.2 Endometer der zweiten Generation.....	19
2.4.1.3 Endometer der dritten Generation.....	20
2.4.1.4 Neuere Entwicklungen und 4. Generation.....	23
2.4.2 Messgenauigkeit der Endometrie.....	25
2.4.2.1. Messgenauigkeit von Geräten der 1. Generation.....	25
2.4.2.2. Messgenauigkeit von Geräten der 2. Generation.....	25
2.4.2.3. Messgenauigkeit von Geräten ab der 3. Generation.....	26
3 Zielsetzung	29
4 Materialien und Methoden	30
4.1 Übersicht und Einteilung der Versuchsgruppen.....	30
4.2 Probenherstellung.....	30
4.2.1 Auswahl der Zähne	30
4.2.2 Vorbereitung der Zähne	31
4.2.3 Aufbereiten der Wurzelkanäle.....	31
4.2.4 Bestimmung der Zahnlänge	32
4.2.5 Röntgenkontrolle	33
4.2.6 Montage der Zähne in die Messvorrichtung.....	33
4.3 Messvorgang	35
4.3.1 Dentaport ZX.....	35
4.3.2 Root-ZX Mini	37
4.3.3 Elements Diagnostic Unit	37
4.3.4 VDW: Raypex 5.....	38
4.4 Statistische Auswertung	39
5 Ergebnisse.....	40

Inhaltsverzeichnis	4
5.1 Fehlende Messwerte	40
5.2 Verteilung und Varianzhomogenität.....	40
5.3 Messgenauigkeit am apikalen Referenzpunkt	41
5.4 Deskriptive Darstellung der Ergebnisse.....	42
5.5 Hypothesenprüfung	48
5.5.1 Erste Hypothese.....	50
5.5.2 Zweite Hypothese	51
6 Diskussion	52
6.1 Material und Methode	52
6.1.1 Eigener Versuchsaufbau am extrahierten Zahn.....	52
6.1.2 Statistische Auswertung.....	54
6.2 Ergebnisse.....	56
6.2.1 Ergebnisse zur Genauigkeit am apikalen Referenzpunkt	56
6.2.2 Ergebnisse im Bereich koronal des Referenzpunkts	58
6.2.3 Vergleich der unterschiedlichen Messelektroden.....	58
7 Klinische Schlussfolgerung	59
8 Zusammenfassungen	60
8.1 Zusammenfassung (vierseitig).....	60
8.1.1 Problematik und Ziel der Studie	60
8.1.2 Material und Methode	60
8.1.3 Ergebnisse	61
8.1.4 Diskussion und klinische Relevanz	62
8.2 Zusammenfassung (einseitig).....	64
8.3 Zusammenfassung (einseitig, englisch).....	65
9 Literaturverzeichnis	66
10 Materialverzeichnis	76
11 Danksagung.....	77
12 Akademische Lehrer	78
13 Ehrenwörtliche Erklärung.....	79

1 Einleitung und Problemstellung

Ziel einer endodontischen Behandlung ist es, das Wurzelkanalsystem eines erkrankten Zahnes instrumentell zu reinigen und zu erweitern, es zu desinfizieren und mit einer festen Wurzelkanalfüllung zu verschließen [ESE 1994]. Die Erfolgsrate dieser Behandlung ist neben anderen Faktoren wesentlich von der Beachtung und Festlegung der sogen. Arbeitslänge abhängig. Wird diese für die Behandlung fehlerhaft bestimmt, so folgen daraus unterschiedliche Konsequenzen. Ist die Arbeitslänge zu kurz, können infizierte Kanalabschnitte nicht instrumentiert und in Folge dessen unzureichend desinfiziert belassen werden. Ist die Arbeitslänge zu lang, so werden Bakterien und Füllungsmaterial in das periapikale Knochengewebe eingebracht, was die Heilung unnötig kompliziert oder in Frage stellt [Hellwig et al. 1999].

Für die Bestimmung der Arbeitslänge ist insbesondere die Lage des apikalen Foramens von Bedeutung. Als idealer Zielpunkt für den Endpunkt der Wurzelfüllung gilt das Foramen apicale, welches sich bei vielen Zähnen nahe der Wurzeloberfläche zunächst einschnürt und dann weit öffnet. Die Einschnürung, die sogenannte apikale Konstriktion gilt als optimaler Endpunkt, da sie einerseits einen sehr kleinen Querschnitt bietet, andererseits zum gut durchbluteten periapikalen Gewebe einen niedrigen Abstand bietet.

Nach der Einführung der Röntgenstrahlen in die Zahnheilkunde im Jahre 1896 (bereits ein Jahr nach ihrer Entdeckung) wird die Arbeitslänge auf Vorschlag des Zahnarztes Meyer L.Rhein im Jahre 1908 röntgenologisch mit einem Referenzstift bestimmt [Cruse&Bellizzi 1980, Castellucci 2003]. Projektionsbedingte Fehler können geometrisch nach dem zweiten Strahlensatz korrigiert werden. Leider ist die Position des Foramens im Röntgenbild nicht zu erkennen, sondern nur im günstigsten Fall die Projektion des anatomischen Apex. Daher wurde über fast 100 Jahre die Position des Foramens bzw. der apikalen Konstriktion nach anatomischen Mittelwerten bestimmt. Hierzu wurden 0,5-1,5 mm von der berechneten Länge aus dem Röntgenbild subtrahiert. Leider befindet sich das Foramen nicht stabil am anatomischen Apex, sondern 0-4 mm koronal hiervon. Die röntgenologische Bestimmung der Arbeitslänge ist daher mit einem gewissen Unsicherheitsfaktor verknüpft.

Seit den grundlegenden Arbeiten von Custer und Suzuki besteht die Möglichkeit auf elektrischem Wege die Arbeitslänge zu bestimmen [Custer 1918, Suzuki 1942]. Hierbei wird die ein Stromfluss zwischen einer Messelektrode (Wurzelkanalinstrument) zum periapikalen Gewebe bestimmt. Eine Weiterentwicklung dieses Messprinzips fand in der

zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts statt, als die Messung des Gleichstromwiderstands zugunsten der Messung einer Wechselstromimpedanz aufgegeben wurde. Messungen nach diesem Prinzip sind direkt am Foramen relativ genau, verlieren ihre Präzision jedoch, wenn die Messelektrode vom Foramen entfernt platziert wird.

Zur Messgenauigkeit dieser Systeme gibt es seit Einführung eine hohe Zahl von Studien [[Gordon&Chandler 2004](#)], die jedoch üblicherweise die Messgenauigkeit direkt am Foramen apicale bestimmen. Die Messelektronik der Geräte arbeitet in der Regel das Messergebnis so auf, dass eine Funktion des Elektrodenabstands zum Foramen apicale erzeugt wird und dies auch auf der Anzeigeskala sichtbar wird. Viele Geräte sind daher mit einer Skala versehen, die einen Abstand vom Foramen apicale darstellt. Da es klinisch nicht immer möglich ist, den Apex mit der Messelektrode zu erreichen und ggf. dies, z.B. bei hoher bakterieller Belastung, auch nicht wünschenswert ist, wäre interessant, ob den Ergebnissen der Endometer auch jenseits des apikalen Zielpunktes vertraut werden kann. Ziel der vorliegenden Studie ist es daher, die Messgenauigkeit von mehreren solchen Endometern in Abhängigkeit von der Entfernung der Messelektrode zum apikalen Foramen zu beurteilen.

2 Literatur

Für die Literaturrecherche wurden zunächst einfache bis fortgeschrittene Standardlehrbücher für Endodontie sowie die Stellungnahmen der Fachgesellschaften (ESE, DGZ und DGZMK) herangezogen [[Hülsmann 1993](#), [Guldener & Langeland 1993](#), [ESE 1994](#), [Hellwig et al. 1999](#), [Ingle & Bakland 2002](#), [Castellucci 2003](#)].

Es folgte die Suche nach Übersichtsartikeln zum Thema Endometrie aus den letzten 10 Jahren in den endodontisch relevanten Zeitschriften (J Endod, Int J Endod, Oral Surg Oral Med Oral Pathol) [[Gordon&Chandler 2004](#), [Nekoofar et al. 2006](#), [Ebrahim et al. 2007](#)].

Zusätzlich wurde eine Suche in Medline mit den Begriffen

"Accuracy and apex locator" (83 Treffer)

durchgeführt. Zusätzlich wurden einzelne Suchen mit den Namen der hier untersuchten Endometrieeräte durchgeführt.

"Root ZX" (97 Treffer)

"Root ZX mini" (4 Treffer)

"Dentaport ZX" (6 Treffer)

"Elements Obturation Unit" (8 Treffer)

"Raypex 5" (7 Treffer)

Über die Medline-Funktion "find related citations" wurde die Suche verfeinert.

Abgeschlossen wurde die Suche durch die manuelle Auswertung der Literaturlisten in den wichtigsten Artikeln mit relevanten Methoden oder Fragestellungen.

2.1 Ablauf der endodontischen Behandlung

Eine endodontische Behandlung ist in folgende Behandlungsabschnitte aufgliedert [ESE1994]:

- **Eröffnung des Zahnes (Trepanation):** Von koronal her wird mit rotierenden Instrumenten ein Zugang zur Pulpenkammer und zu den Eingängen in die Wurzelkanäle eröffnet (siehe Abb. 2.1).
- **Entfernung des Weichgewebes:** Entfernung der vitalen, entzündeten, gangränösen oder nekrotischen Pulpa aus dem Wurzelkanalsystem. Dies geschieht in der Regel mit endodontischen Handinstrumenten.
- **Längenbestimmung:** Die Arbeitslängen werden endometrisch und/oder röntgenologisch bestimmt.

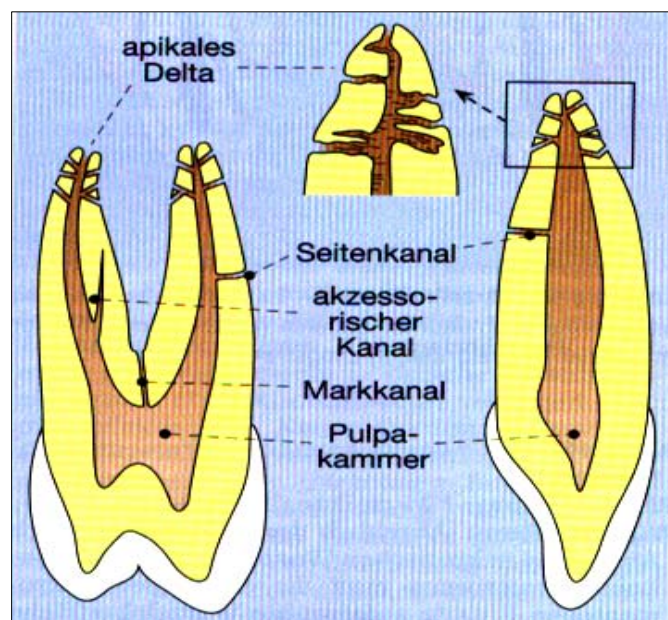


Abb. 2.1: Wurzelkanal eines Seitenzahnes und eines Schneidezahnes mit deltaförmigen Verzweigungen sowie Seiten- und Markkanälen. Bildquelle: [Maschinski, 2000].

- **Aufbereitung:** instrumentelle Aufbereitung des Wurzelkanals um einen genügend großen Durchmesser herzustellen, damit Desinfektionsmittel und Füllmaterialien von koronal eingebracht werden können.
- **Desinfektion:** Desinfektion der bearbeiteten und nicht bearbeiteten Wurzelkanaloberfläche mit flüssigen oder gasförmigen Desinfektionsmitteln.
- **Obturation des Wurzelkanalsystems:** Verschluss des Wurzelkanallumens mit einem geeigneten Füllmaterial.

Hierbei werden die prinzipiellen Arbeitsschritte „Weichgewebsentfernung“, „Aufbereitung“ sowie „Desinfektion“ häufig in einen Arbeitsgang zusammengefasst.

2.2 Die Arbeitslänge in der Endodontie

2.2.1 Definition und Bedeutung der Arbeitslänge

Ziel der Wurzelkanalaufbereitung ist die Entfernung von Weichgewebe und infiziertem Dentin, die Erweiterung unter Beibehaltung von apikaler Konstriktion und ursprünglichem Verlauf sowie die dreidimensionale konische Ausformung des aufzubereitenden Kanals [Schilder 1974]. Hierbei wird Wert gelegt, auf die Schonung der anatomischen Strukturen im Apexbereich, was nur durch eine korrekte Arbeitslänge gewährleistet werden kann. Die Arbeitslänge ist definiert als „die Distanz zwischen einem koronalen Referenzpunkt und einem apikalen Referenzpunkt“ [Guldener&Langeland 1993]. Hierbei muss der koronale Referenzpunkt am zu behandelnden Zahn eindeutig festgelegt werden, als apikaler Referenzpunkt wird in der Regel das Foramen physiologicum herangezogen [Guldener&Langeland 1993].

Die Ermittlung einer korrekten Arbeitslänge ist insofern wichtig, weil die Konsequenzen für eine falsch bestimmte Arbeitslänge erheblich sind. Bei einer zu kleinen Arbeitslänge resultiert eine Unterinstrumentierung, bei welcher nekrotisches und infiziertes Gewebe im Wurzelkanal zurückbleibt. Hierbei wird ein periapikales entzündliches Geschehen in Gang gehalten oder dieses überhaupt erst verursacht [Hülsmann 1993]. Bei einer zu lang

gewählten Arbeitslänge wird die Anatomie des Foramen apicale zerstört und das periapikale Gewebe wird durch Spülflüssigkeiten, Füllungsmaterial und hierhin eingebrachtes infiziertes Material traumatisiert, was wiederum Grundlage für die Ausbildung einer periapikalen Entzündung ist [Hülsmann 1993].

Diese Problematik ist auch in Studien zur Langlebigkeit von Wurzelkanalfüllungen demonstriert worden. Hier haben Wurzelfüllungen mit korrekter Länge eine deutlich höhere Überlebenswahrscheinlichkeit als solche mit zu kurzer oder zu langer Wurzelfüllung [Stoll et al. 2005].

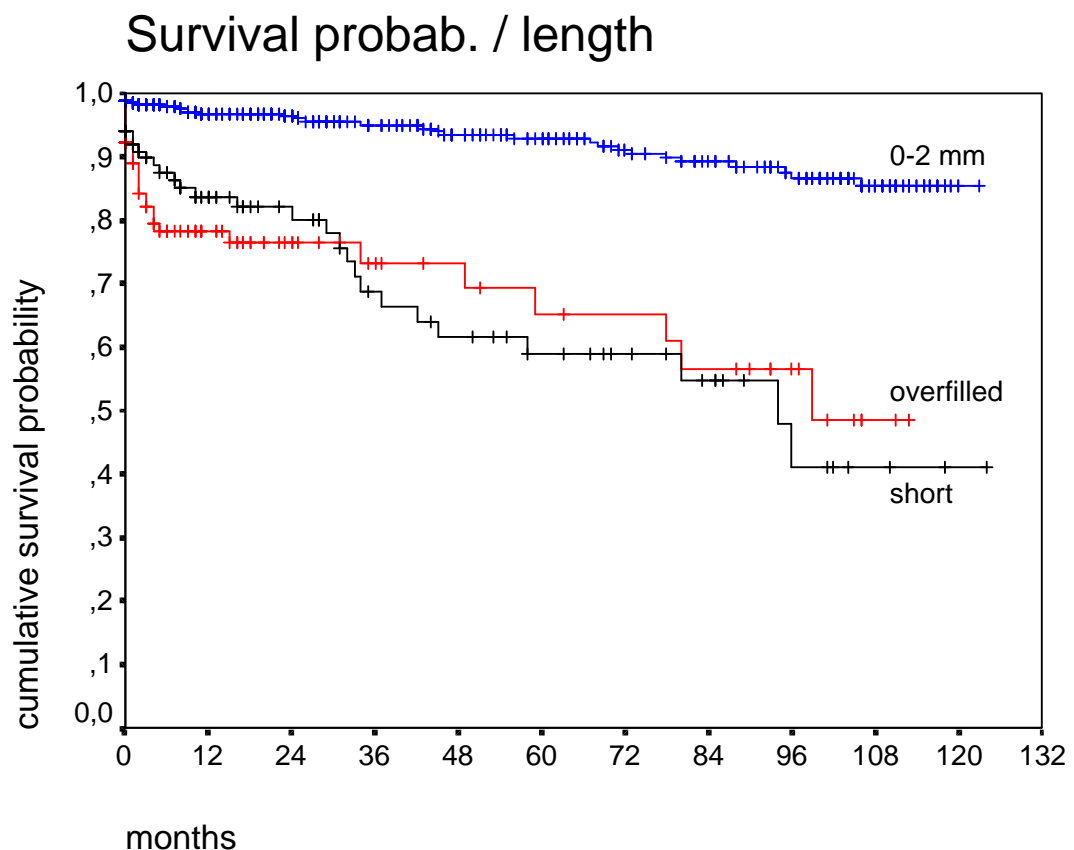


Abb. 2.2: Überlebensdauer nach Kaplan&Meier bei Wurzelfüllungen mit unterschiedlicher Arbeitslänge. Ein apikales Ende der Füllung wurde hier als korrekte Arbeitslänge akzeptiert. [Stoll et al. 2005].

2.2.2 Anatomie der apikalen Region

Klinisch wird entweder das Foramen apicale oder ein intracanalär gelegener Punkt nahe des Foramens als apikaler Referenzpunkt gewählt. Kuttler [Kuttler 1955] konnte zeigen, dass sich der Durchmesser des Foramens an der Wurzeloberfläche ("major diameter") in vielen Fällen nach intern noch reduziert und dort eine Konstriktion ("minor diameter") bildet. Diese apikale Konstriktion wird auch als physiologischer Apex, Foramen physiologicum oder apikale Konstriktion bezeichnet (Abb. 2.3). Eine von einzelnen Studien angenommene Korrelation dieser Konstriktion mit dem histologischen Endpunkt der Wurzelzementbedeckung, wie dies auch in Abb. 2.3 impliziert wird, konnte in einer aktuellen Studie [Ponce & Fernandez 2003] nicht belegt werden.

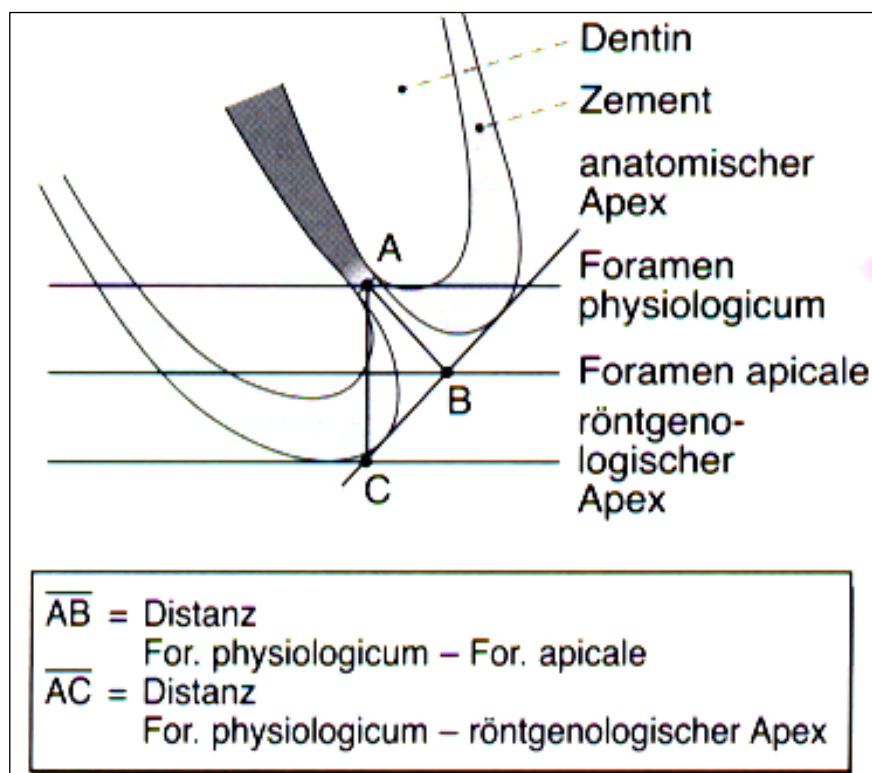


Abb. 2.3: Anatomie und Topographie der Wurzelspitze. A=Foramen physiologicum (minor diameter), B=Foramen apicale (major diameter), C=röntgenologischer Apex (bei entsprechender Projektionsrichtung). Eingezeichnet sind weiterhin die Abstände zwischen dem Foramen physiologicum und den anderen Bezugspunkten. Bildquelle: [Hellwig et al. 1999].

Leider kann die Lage der apikalen Konstriktion nur mikroskopisch durch histologische Schnitte sicher aufgefunden werden. Zudem zeigen neuere Studien, dass eine apikale Konstriktion nur in weniger als 50% der Wurzeln vorhanden ist [Dummer et al. 1984]. Auch das Foramen selbst ist nur histologisch eindeutig zu lokalisieren, weil es nicht regelmäßig mit dem anatomischen oder röntgenologischen Apex zusammenfällt [Burch&Hulen 1972], sondern häufig exzentrisch und bis zu 3 mm vor dem anatomischen Apex liegt [Dummer et al. 1984]. Die Annahme des röntgenologischen Apex als Referenzpunkt führt daher zu Überinstrumentation.

Die apikale Konstriktion liegt also in jedem Fall vor dem röntgenologischen Apex, was zu der Methode führte, von diesem ausgehend eine bestimmte Sicherheitsdistanz einzuhalten. Die Distanz vom anatomischen Apex (röntgenologischer Apex bei orthoradialer Projektion) bis zum Foramen apicale wird zwischen 0,36 mm [Dummer et al. 1984], 0,48 mm [Kuttler 1955] und 0,6 mm [Burch&Hulen 1972] angegeben. Der Abstand vom anatomischen Apex bis zur Konstriktion wird mit durchschnittlich 0,89 mm angegeben [Dummer et al. 1984] wobei jedoch ein Range zwischen 0,7 und 2,7 mm berücksichtigt werden muss.

Für die klinische Praxis sind Sicherheitsdistanzen von 0,5-1,5 mm zum röntgenologischen Apex üblich [Ricucci 1998, Stoll et al. 2001] wobei angenommen wird, dass anatomischer und röntgenologischer Apex übereinstimmen oder zumindest nicht weit auseinanderliegen (entspricht der Distanz AC in Abb. 2.3). Eine korrekte Lokalisation ist bei Anwendung dieser Werte im röntgenologischen Verfahren in etwa 82-89% der Fälle möglich [Olson et al. 1994].

2.3 Die röntgenologische Bestimmung der Arbeitslänge

Bei den klassischen röntgenologischen Verfahren wie z.B. der radiologischen Annäherungstechnik nach Ingle [Ingle 1957] wird zunächst ein Metallinstrument in den Wurzelkanal eingeführt. Für die initiale Einstecktiefe werden z.B. Durchschnittswerte oder eine abgemessene Zahnlänge auf einem initialen Röntgenbild herangezogen. Nun wird zusammen mit dem Instrument eine sogen. Mess-Röntgenaufnahme angefertigt und die Länge des Zahnes auf dem Bild (Arbeitslänge) mit der bekannten Länge des Wurzelkanalinstrumentes verglichen (Abb. 2.4 und 2.5).

Nachteile dieses Verfahrens sind die projektionsbedingten Abbildungsfehler im Röntgenbild und die überstehenden Instrumentengriffe. Diese erschweren einerseits die Hygiene, weil Speichel in die Trepanationsöffnung fließen kann, andererseits stören sie bei der korrekten Durchführung der Röntgenaufnahme.

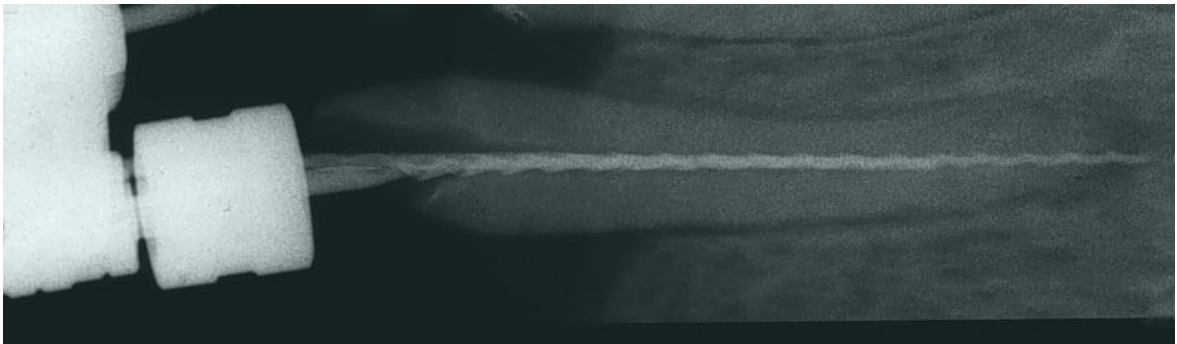


Abb. 2.4: Konventionelle Messaufnahme mit einem Handinstrument und einem Stopper zur Festlegung des koronalen Referenzpunktes. Das Instrument ist hier unbeabsichtigt über das Foramen apicale hinaus geschoben worden, wobei Mikroorganismen in das periapikale Gewebe eingepfropft werden können. (Bildquelle: Prof. Stoll)

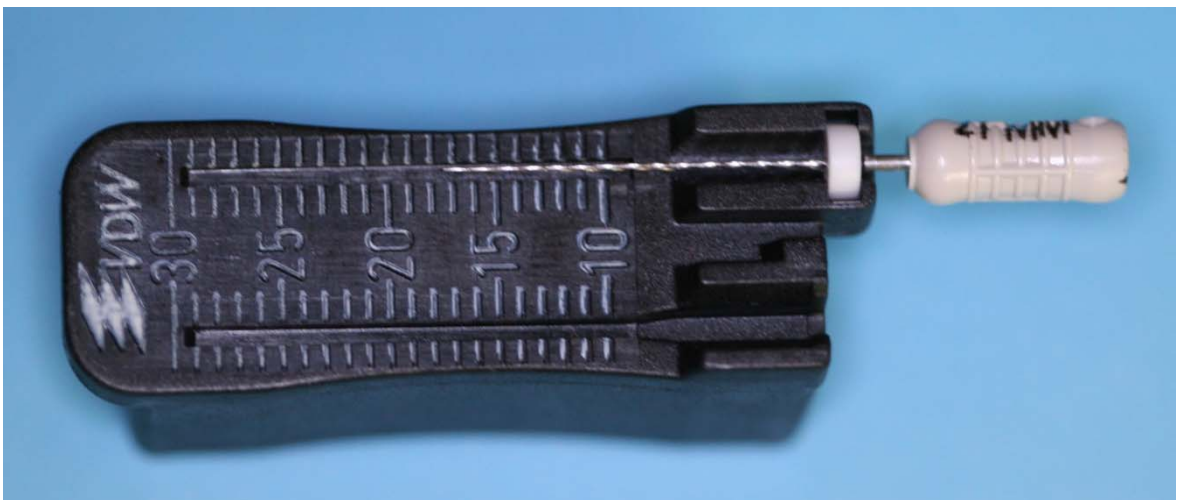


Abb. 2.5: Wurzelkanalinstrument auf einer Messlehre. Die Länge von der Instrumentenspitze zum Gummistopper kann hier mit einer Messgenauigkeit von ca. 0,5 mm abgelesen werden. Im Bild beträgt die Länge ca. 17,5 mm.

Zum Ausgleich der projektionsbedingter Fehler auf dem Röntgenfilm wird in der Regel versucht, die Röntgenprojektion möglichst orthoradial durchzuführen [[Hülsmann&Rödig 2001](#), [ESE 1994](#)]. Die normalerweise für diese Paralleltechniken verwendeten Halter können aber mit herausragenden Instrumentengriffen nicht verwendet werden. Es wurde daher vorgeschlagen, statt der Handinstrumente einen dünnen Silberstift als Referenz in den Wurzelkanal einzubringen und diesen am Referenzpunkt abzuschneiden. Zusätzlich kann hierbei die Trepanationsöffnung mittels Silikonmaterials speicheldicht verschlossen werden [[Stoll 2008](#)]. Dadurch wird die Verwendung von Filmhaltern für die Paralleltechnik möglich ([Abb. 2.6](#)).

Projektionsbedingte Fehler lassen sich auch durch Anwendung des 2. Strahlensatzes nach folgender Formel mathematisch korrigieren [[Guldener&Imobersteg 1972](#)]:

$$ZL = IL * \frac{ZLR}{ILR}$$

Hierbei ist IL die wahre Instrumentenlänge, ZL die gesuchte wahre Zahnlänge, ILR die Instrumentenlänge im Röntgenbild und ZLR die Zahnlänge im Röntgenbild. Die heute üblichen digitalen Röntgensysteme beinhalten häufig Optionen, Bilder nach diesem Prinzip in einer Richtung oder in mehreren Richtungen zu kalibrieren ([Abb. 2.7](#)) [[Stoll et al. 2001](#)]. Bei Abweichungen des Messinstrumentes von mehr als 3 mm bezogen auf die Zahnlänge sollte eine zweite Messaufnahme angefertigt werden [[Guldener 1993](#)].

Die beschriebene Röntgenmesstechnik muss für alle Wurzelkanäle eines Zahnes durchgeführt werden, hierbei sind häufig mehrere Aufnahmen nötig um einzelne Kanäle zu differenzieren und den röntgenologischen Apex erkennbar zu projizieren.

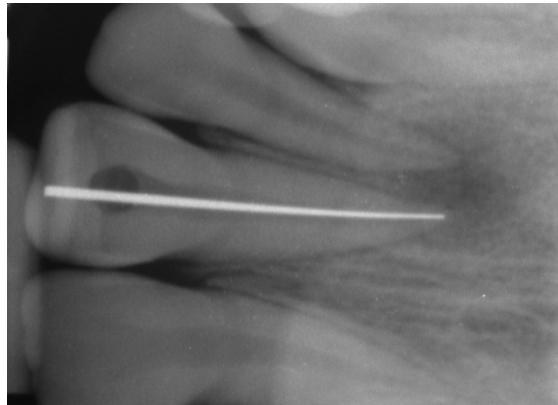


Abb. 2.6: Meßaufnahme in Paralleltechnik mit Silberstift als Referenz. Apikale und koronale Begrenzung sind deutlich auszumachen, der Silberstift bietet einen überlegenen Röntgenkontrast im Vergleich zum Werkzeugstahl konventioneller Handinstrumente. Am unteren Bildrand ist die Aufbissplatte des Filmhalters für die Rechtwinkelprojektion zu sehen. (Bildquelle: Prof. Stoll)

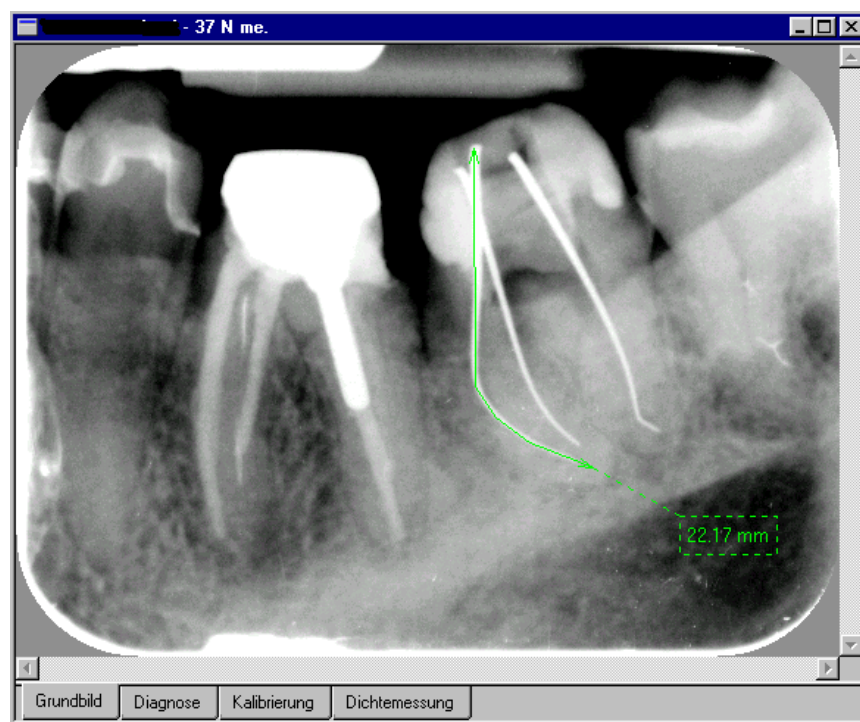


Abb. 2.7: Meßaufnahme in Paralleltechnik mit Silberstift als Referenz (Software: Digora 2.5). In modernen Softwareoberflächen für die digitale Radiografie werden bereits Möglichkeiten für die Kalibrierung von Projektionsfehlern und die Längenbestimmung mittel Streckenzügen vorgesehen [Stoll et al. 2001].

2.4 Die endometrische Bestimmung der Arbeitslänge

Endometrie beruht auf einer Widerstands- (mit Gleichstrom) oder Impedanzmessung (mit Wechselstrom bei einer oder mehreren Frequenzen) zwischen einer intrakanalären Elektrode und einer Körperreferenzelektrode (Abb. 2.8 und 2.9). Bei Annäherung der Elektrode (Wurzelkanalinstrument) an das Foramen apicale kommt es hierbei zu einem mehr oder weniger starken Widerstandsabfall. Im Idealfall können Messgeräte auf diesen Punkt des Widerstandsverlaufs so eingestellt werden, dass mittels einer optischen oder akustischen Anzeigeeinrichtung dieser Punkt lokalisiert werden kann.

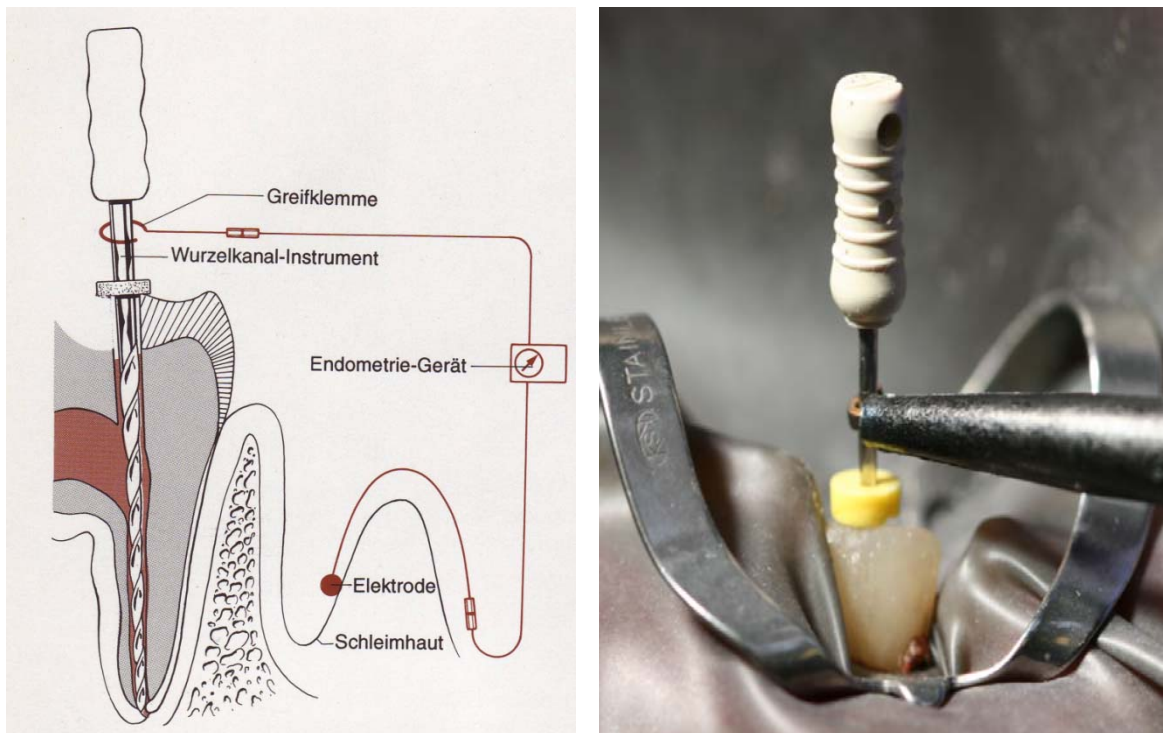


Abb. 2.8 (links): Prinzip der Endometrie: Zwischen einem Instrument im Wurzelkanal und der Schleimhautoberfläche wird eine Spannung angelegt und ein Stromkreis geschlossen. Gemessen wird der Widerstand zwischen den beiden Elektroden in Abhängigkeit zur Eindringtiefe des Instruments. Bildquelle: [Hülsmann 1993].

Abb. 2.9 (rechts): Klinische Anwendung: Der zu messende Zahn wird durch ein Gummituch (Cofferdam) von der Mundhöhle isoliert. Ein dünnes Wurzelkanalinstrument wird in den Kanal eingeführt, ein Gummistopper der direkt am koronalen Referenzpunkt anliegt, ermöglicht die spätere Längenmessung. An das Instrument wird ein Anschluss des Endometriegerätes mit einem Messclip leitend befestigt. (Bildquelle: Prof. Stoll)

2.4.1 Historische Entwicklung

2.4.1.1 Grundlagen und Geräte der ersten Generation

Im Jahre 1918 beschrieb Custer als erster die Anwendung eines elektrischen Verfahrens zur Bestimmung von Arbeitslängen [Custer 1918]. Suzuki konnte im Jahr 1942 tierexperimentell belegen, dass zwischen der Mundschleimhaut und dem parodontalen Ligament ein konstanter Gleichstromwiderstand existiert, der später von Sunada mit einem Wert von ca. 6,5 k Ω bestimmt wurde [Suzuki 1942, Sunada 1962]. Gordon und Sunada entwickelten die Theorie von Suzuki weiter zu ersten praktisch verfügbaren Messgeräten zur elektrischen Arbeitslängenbestimmung [Gordon 1960, Sunada 1962]. Diese Geräte werden im deutschen Praxisgebrauch Endometer genannt, international wird die Abkürzung EAL verwendet (electronic apex locator). Letzterer Begriff ist irreführend, da mit diesen Geräten nicht der Apex lokalisiert wird, ein Vorschlag von Nekoofar, die Geräte als ERCLMD (electronic root canal length measurement devices) zu bezeichnen, wurde wohl wegen der langen und komplexen Bezeichnung nicht aufgegriffen [Nekoofar et al. 2006].

Die ersten Endometrieeräte waren Gleichstrommessgeräte, die den Apex bei dem von Sunada ermittelten Widerstandswert von 6,5 k Ω anzeigten (Abb. 2.10, Abb. 2.11), hier wurde dann ein Stromfluss von ca. 40 μ A erzielt [Ebrahim et al. 2007]. Leider war die Genauigkeit dieser Geräte klinisch nicht ausreichend. Dies liegt daran, dass der Stromfluss im Gewebe auf einer ionischen Leitung basiert und der Stromfluss an den Elektroden von einer metallischen Leitung auf die ionische Leitung übergeht. Es kommt hierbei zu starken Einflüssen durch den Elektrolyten und zu Elektrodenpolarisationsphänomene. Diese Einflüsse konnten auch durch die Anwendung von Kalibrierungsverfahren oder besonderen Messelektroden nicht behoben werden.

Auch die von Suzuki postulierte Konstante von 6,5 k Ω konnte nicht verifiziert werden, *in vitro* Versuche von Huang belegten, dass es sich hierbei nicht um eine biologische Konstante handelt, sondern um eine physikalisch erklärbare Messgröße [Huang 1987].

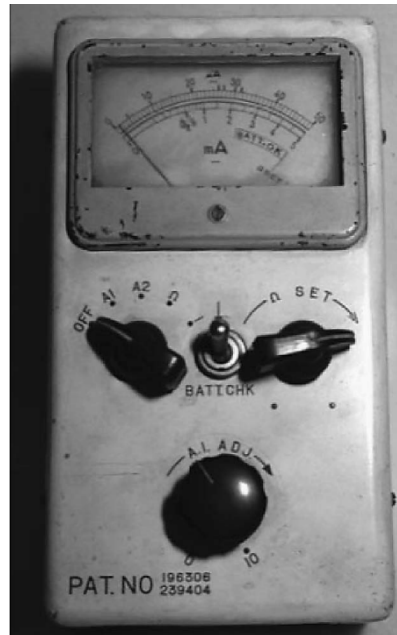


Abb. 2.10: Widerstandsmessgerät vom Gleichstromtyp, mit welchem mutmaßlich die ersten Versuche von Sunada durchgeführt wurden. Bildquelle: [Ebrahim et al. 2007].

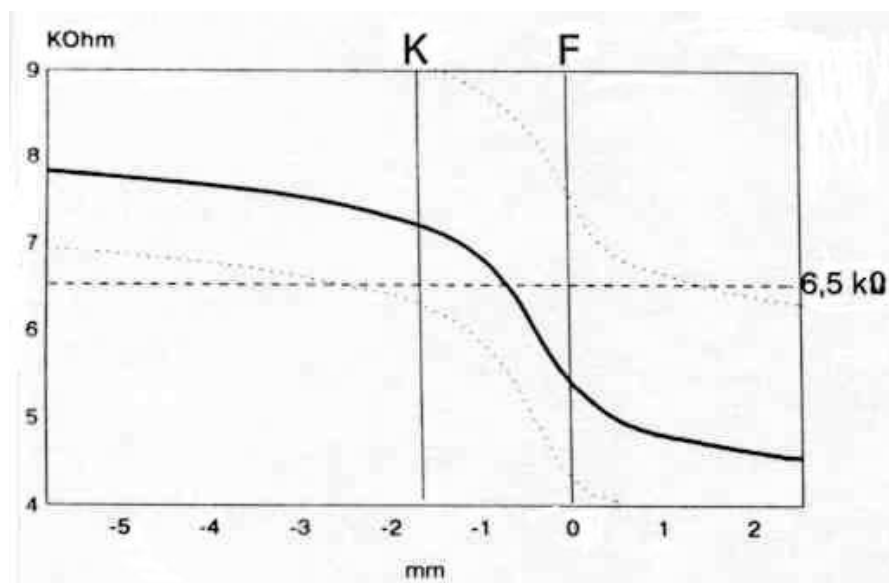


Abb. 2.11: Messkurve eines Endometers der ersten Generation. Die Kurve verläuft sigmoidal und zeigt einen Abfall im Bereich zwischen Konstriktion und Foramen. Die von Suzuki postulierte Grenze von 6,5 kΩ ist als horizontale Linie eingezeichnet. Bildquelle: [Voß 1993].

2.4.1.2 Endometer der zweiten Generation

Bereits 1969 wurde durch Sunada eine zweite Generation von Geräten vorgestellt [Kobayashi 1995, Gordon&Chandler 2004], welche statt dem mit Gleichstrom gemessenen ohmschen Widerstand auf einer Impedanzmessung mit Wechselstrom basieren (Abb. 2.12, Abb. 2.13) [Ebrahim et al. 2007]. Durch den häufigen Polaritätswechsel beim Wechselstrom können die elektrophysikalischen Polarisationsprozesse vermindert werden, die den Messvorgang bei Geräten der ersten Generation deutlich behindert hatten [Hör&Attin 2001]. Auch bei Verwendung von Wechselstrom kommt es zu einem Widerstand zwischen den Elektroden und dem Gewebe. Es konnte gezeigt werden, dass diese Elektrodenimpedanz deutlich größer ist als die Impedanz im Elektrolyten. Bei einer Messfrequenz von 1 kHz machen Elektrodenphänomene ca. 90% des Messwertes aus [Voß 1989, Voß 1990, Voß 1993]. Weiterhin bleibt auch hier der Einfluss des Elektrolyten auf die Messwerte nicht unbeträchtlich [Gordon&Chandler 2004].

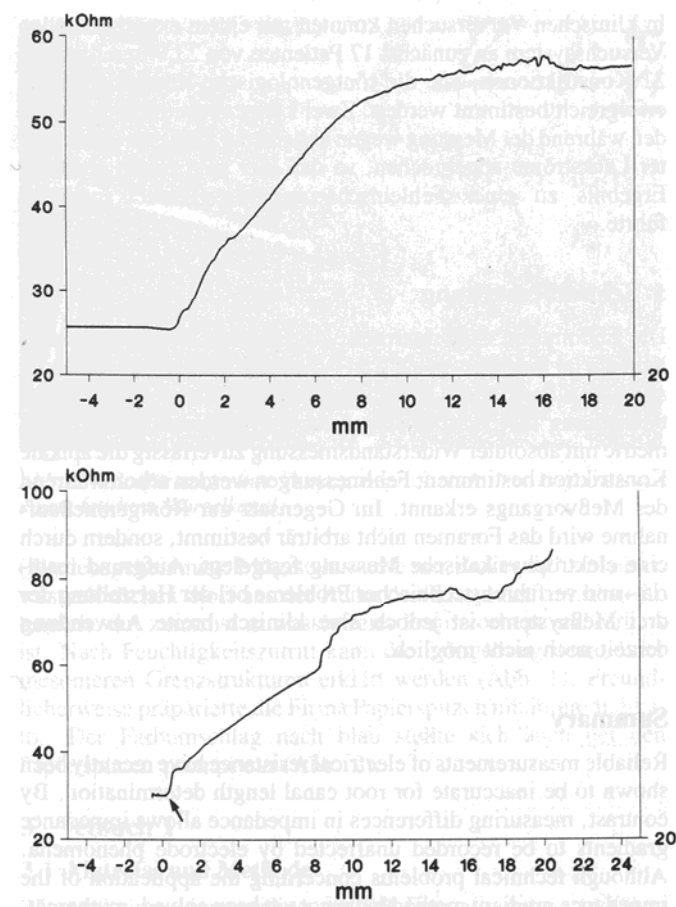


Abb. 2.12: Impedanzprofile von natürlichen Zähnen *in vitro* (oben) und *in vivo* (unten). Der Pfeil zeigt den Übergang durch das Foramen. Bildquelle: [Voß 1990].

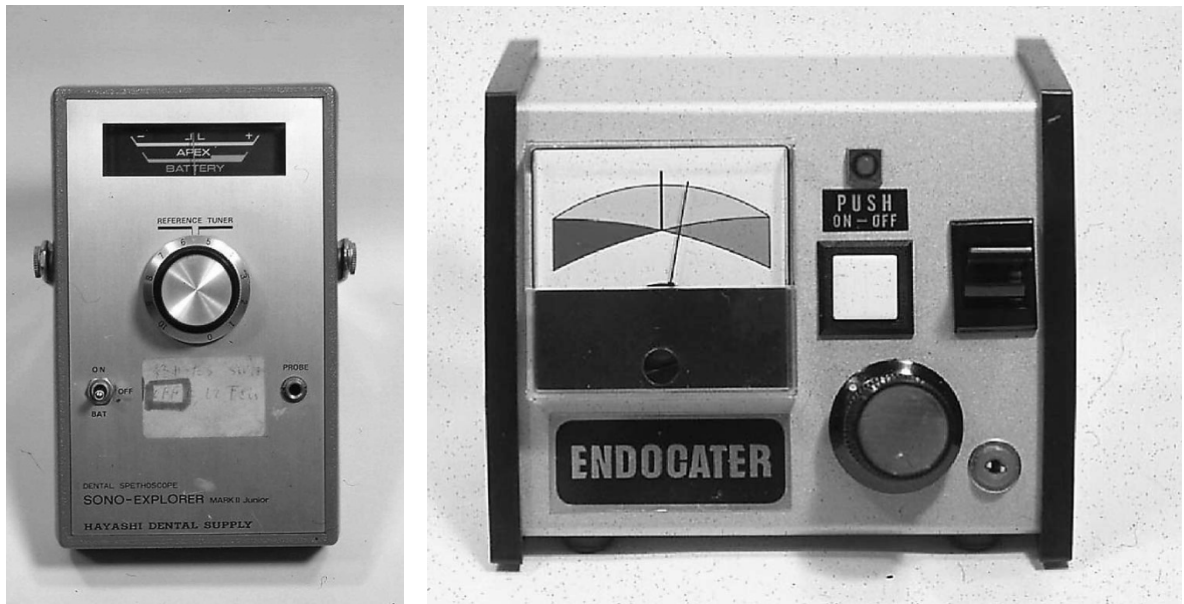


Abb. 2.13: Sono-Explorer (links) und Endocater (rechts) als Beispiele für Endometer der zweiten Generation. Bildquelle: [Ebrahim et al. 2007].

2.4.1.3 Endometer der dritten Generation

Moderne Geräte basieren auf der Tatsache, dass sich Elektrodenphänomene bei verschiedenen Messfrequenzen unterschiedlich bemerkbar machen. So werden mehrere Messfrequenzen zwischen 0.4 und 10 kHz verwendet und über die Elektronik des Gerätes miteinander verrechnet [Voß 1990, Kobayashi&Suda 1994, Voß 1994]. Die von Yamaoka verwendete Differenzbildung von zwei gemessenen Impedanzen [Kobayashi 1995] hatte den Nachteil, dass für dieses **Differenzverfahren** ein Kalibrierungsvorgang im Kanal notwendig war (Abb. 2.14 und 2.15).

Verbreitet sind bis heute Geräte, die auf dem **Quotientenverfahren** arbeiten (Abb. 2.16 und 2.17). Hier wird mit dem Quotient zwischen den Impedanzen zweier Messfrequenzen eine neue Messfunktion errechnet, welche im Bereich der apikalen Konstriktion einen steilen Verlauf nimmt. Die Apexanzeige erfolgt im Bereich der starken Steigung dieser Kurve, ist jedoch technisch bedingt auf empirische Werte eingestellt, da während des Messvorgangs die Eindringtiefe nicht vom Gerät für die Bestimmung hinzugezogen werden kann.

Mit diesem Verfahren wurde eine weitgehende Unabhängigkeit vom Elektrolyten und von den Elektrodenimpedanzen erzielt [Hör&Attin 2001].



Abb. 2.14: Skala eines Gerätes mit Differenzberechnung (APIT, Firma Osada, Tokyo, Japan).

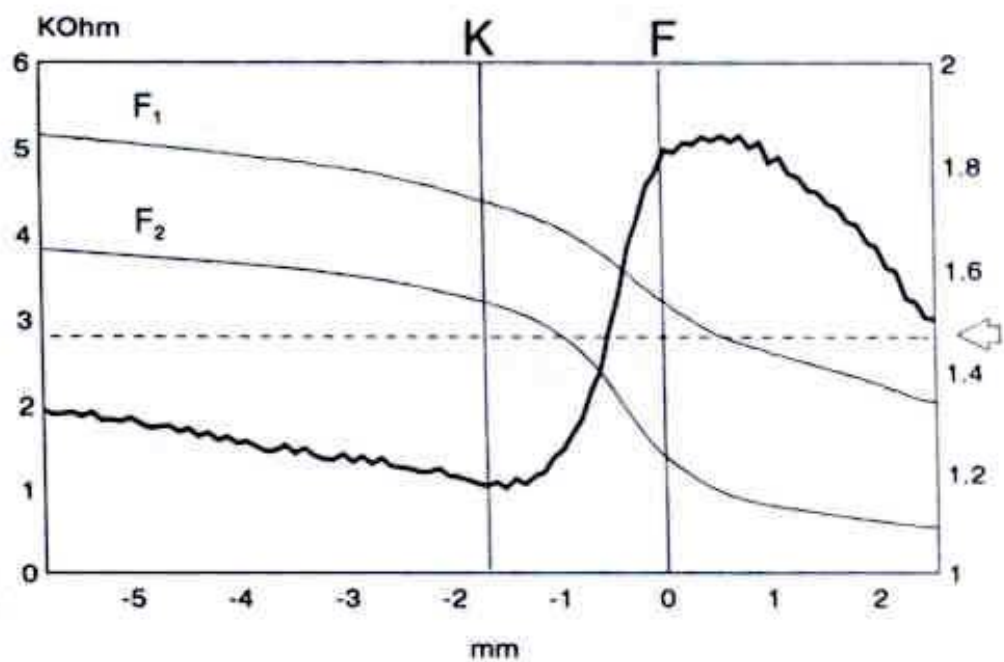


Abb. 2.15: Messkurve eines Endometers der dritten Generation mit Differenzbildung. Die Kurve verläuft sigmoidal und hat einen steilen Anstieg im Bereich zwischen Konstriktion und Foramen apicale. Die Justierung für die Anzeige des Foramen apicale wird auf den Wendepunkt der Kurve gelegt (Pfeil). Bildquelle: [Voß 1993].

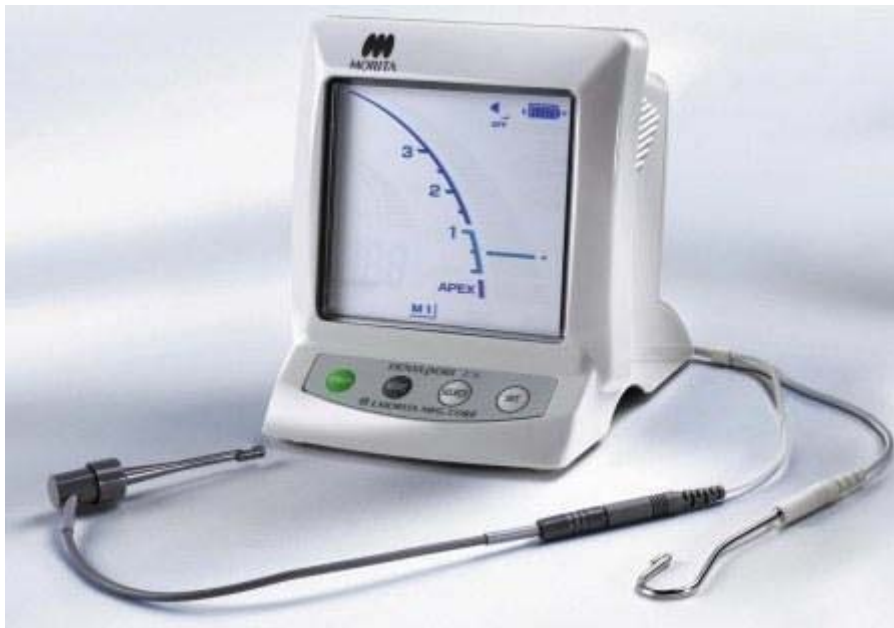


Abb. 2.16: Das Root ZX (Firma Morita, Kyoto, Japan), ein Endometers der dritten Generation mit Quotientenbildung. Bildquelle: Firma Morita.

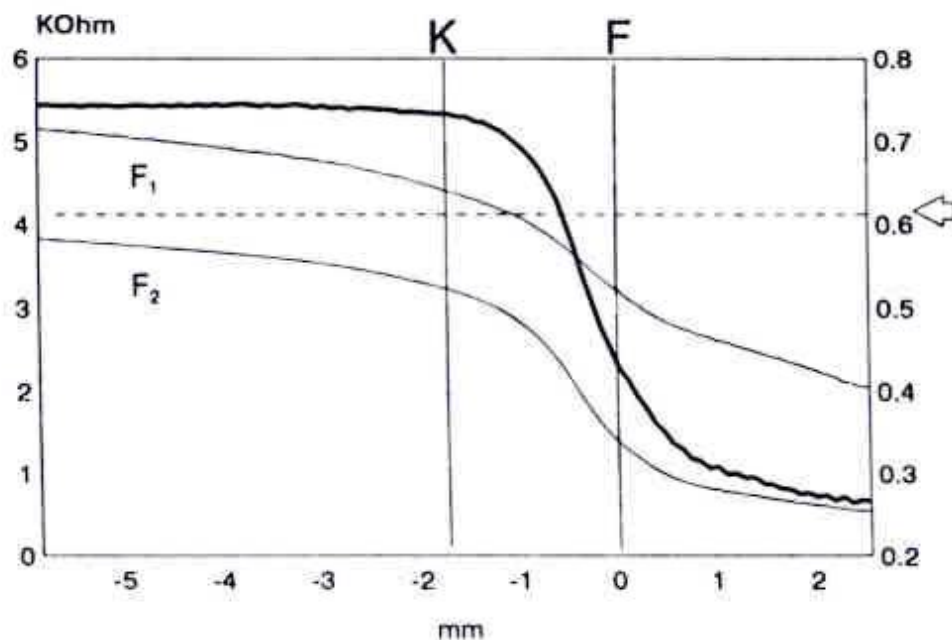


Abb. 2.17: Messkurve eines Endometers der dritten Generation mit Quotientenbildung. Die Kurve verläuft sigmoidal und hat einen steilen Abfall im Bereich zwischen Konstriktion und Foramen apicale. Die Justierung für die Anzeige des Foramen apicale erfolgt hier beim Beginn des starken Impedanzabfalls (Pfeil). Bildquelle: [Voß 1993].

2.4.1.4 Neuere Entwicklungen und 4. Generation

Neuere Geräte verändern die bisher erfolgreichen Messstrategien in verschiedene Richtungen. Einerseits werden statistische Prozeduren und Vergleiche mit internen Datenbanken verwendet um die Genauigkeit der Apexlokalisation zu steigern, andererseits wurde die elektronische Signalaufbereitung der Geräte verbessert [Gordon&Chandler 2004]. Manche Geräte versuchen durch den Einsatz von bis zu 5 Messfrequenzen eine Verwendung von beliebigen Elektrolyten im Kanal zu erzielen (Abb. 2.18) [Gordon&Chandler 2004].

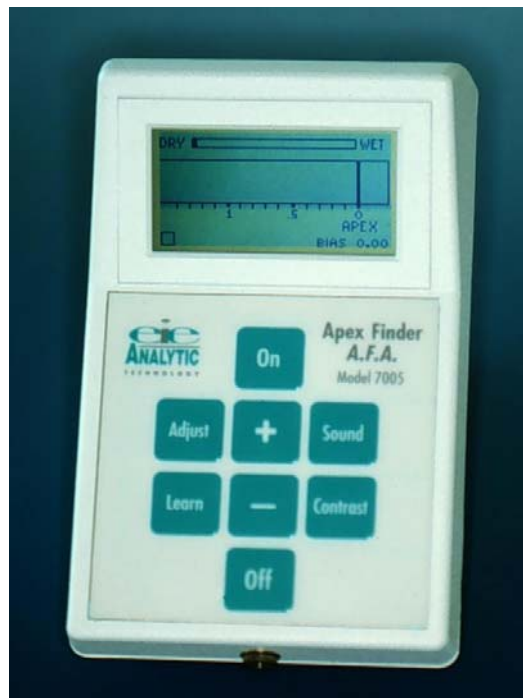


Abb. 2.18: Apex Finder AFA (Firma EIE, Analytic Technologies 2002) als Beispiel für ein neueres Gerät, welches mit insges. 5 Messfrequenzen arbeitet. Hierdurch verspricht man sich eine vollständige Unabhängigkeit vom Elektrolyten [Nekoofar et al. 2006].

Neuere Geräte wie z.B. die Elements Diagnostic Unit (Firma Sybron Endo) messen neben der Impedanz auch die Kapazität im Messkreis und gleichen die gemessenen Daten mit ihrer internen Datenbank ab.

Kombinationsmöglichkeiten mit Winkelstücken (Abb. 2.19) ermöglichen die Messung während der Aufbereitung mit rotierenden Instrumenten im Sinne einer „dynamischen Endometrie“ [Zmener et al. 1999]. Interessant für die Zukunft ist hierbei die Rückführung der Endometrieinformationen in die Motorelektronik um z.B. eine Drehzahlverminderung am endometrischen Apex „auto apical slowdown“ einzuleiten. Dies ermöglicht eine taktile Übermittlung der Endometrieinformation an den Behandler.



Abb. 2.19: Dentaport ZX (Firma Morita, Kyoto, Japan) als Beispiel für ein Gerät, bei welchem die Messergebnisse des Endometers zur Steuerung des Antriebsmotors verwendet werden.

Bildquelle: Firma Morita.

2.4.2 Messgenauigkeit der Endometrie

Zur charakterisierung der Messgenauigkeit von Endometern wird zumeist der Prozentsatz von Messungen im Bereich $\pm 0,5$ mm um den Referenzpunkt angegeben. Als Referenzpunkte werden das Foramen apicale oder die apikale Konstriktion verwendet. Auch wenn in moderneren Studien häufig statistische Maße zur Beschreibung von Verteilungen herangezogen werden [[Briseno-Marroquin et al. 2008](#)], so wird in Übersichtsarbeiten die klassische Darstellung zur besseren Vergleichbarkeit bevorzugt [[Gordon&Chandler 2004](#)].

2.4.2.1. Messgenauigkeit von Geräten der 1. Generation

Mit den Geräten Dentometer (Dahlin Electromedicine, Kopenhagen, Dänemark) und Endo Radar (Elettronica Liarre, Imola, Italien) konnten lediglich ungenaue Längen im Vergleich zur Röntgentechnik ermittelt werden. Viele der Messungen waren länger oder kürzer als die konventionell ermittelte Arbeitslänge [[Tidmarsh et al. 1985](#)].

2.4.2.2. Messgenauigkeit von Geräten der 2. Generation

Mit den Geräten der zweiten Generation konnten zum Teil deutlich bessere Ergebnisse erzielt werden. Die [Tabelle 2.1](#) zeigt einige Ergebnisse zitiert nach [Gordon&Chandler \[2004\]](#). Hierbei sollte berücksichtigt werden, dass auch mit sehr ungenauen Methoden wie z.B. der taktilen Exploration eine Genauigkeit von 64 % erreicht werden kann [[Seidberg et al 1975](#)]. Für den Beleg der Äquivalenz oder Überlegenheit eines endometrischen Messverfahrens sollten daher deutlich bessere Ergebnisse erzielt werden.

Studie	Jahr	Gerät	Genauigkeit
Inoue	1973	Sono Explorer	92 %
O'Neill	1974	Sono Explorer	83%
Seidberg et al.	1975	Sono Explorer	48%
Blank et al.	1975	Sono Explorer	89%
Blank et al.	1975	Endometer	85%
Chunn et al.	1981	Forameter	15%
Trope et al.	1985	Sono Explorer MK III	90,6%
Inoue & Skinner	1985	Sono Explorer MK III	57,7%
Wu et al.	1992	Sono Explorer MK III	77,5%
Kaufman et al.	1989	Dentometer	56%
Kaufman et al.	1989	Sono Explorer MK II	44%
McDonald&Hovland	1990	Endocater	93,4%
Keller et al.	1991	Endocater	67,7%

Tab. 2.1: Genauigkeit von verschiedenen Endometriegeräten der zweiten Generation bei Lokalisation des Foramen apicale in unterschiedlichen Studien, entnommen aus [Gordon&Chandler 2004]. Angegeben wird der Prozentsatz der Messungen im Intervall $\pm 0,5$ mm um das Foramen apicale. Ergebnisse unter 80% werden unterlegt dargestellt.

2.4.2.3. Messgenauigkeit von Geräten ab der 3. Generation

Mit Geräten ab der dritten Generation können deutlich genauere und reproduzierbare Ergebnisse [Visser et al. 1991, Certosimo et al. 1999, Kobayashi 1995, McDonald 1992, Stoll 2007], teilweise unabhängig vom Elektrolyten [Kobayashi&Suda 1994, Frank&Torabinejad 1993], erzielt werden, sofern der Apex eine normale anatomische Struktur aufweist. Die **Tabelle 2.2** zeigt einige Ergebnisse für *in vitro* Studien zitiert nach Gordon&Chandler [2004].

Der Zustand des pulpalen Gewebes (vital oder nekrotisch) hat keinen Einfluss auf die Messergebnisse [Mayeda et al. 1993, Dunlap et al. 1998], ebenso wenig wie die Anwendung von Gleitmitteln wie z.B. RC-Prep [McDonald 1992] oder ob das Metall der Elektroden aus Stahl oder Nickel-Titan besteht [Thomas et al. 2003].

Studie	Jahr	Gerät	Genauigkeit
Fouad et al.	1993	Apit	73%
Mayeda et al.	1993	Apit	66%
Frank&Torabinejad	1993	Apit	90%
Felippe&Soares	1994	Apit	96,5%
Arora&Gulabivala	1995	Apit	72%
Pratten&McDonald	1996	Apit	82%
Lauper et al.	1996	Apit	93%
Ounsi&Haddad	1998	Apit	85%
Weiger et al.	1999	Apit	59%
DeMoor et al.	1999	Apit	100%
Martinez-Lozano et al.	2001	Apit	68%
Czerw et al.	1995	Root ZX	100%
White et al.	1996	Root ZX	84%
Ounsi&Naaman	1999	Root ZX	85%
Shabahang et al.	1996	Root ZX	96%
Weiger et al.	1999	Root ZX	85%
Meares&Steiman	2002	Root ZX	83%

Tab. 2.2: Genauigkeit von verschiedenen Endometriegeräten der dritten Generation bei Lokalisation des Foramen apicale in unterschiedlichen Studien, entnommen aus [Gordon&Chandler 2004]. Angegeben wird der Prozentsatz der Messungen im Intervall $\pm 0,5$ mm um das Foramen apicale. Ergebnisse unter 80% werden unterlegt dargestellt.

In vivo Messungen an zu extrahierenden Zähnen erfolgen häufig so, dass die Zähne trepaniert und elektrometrisch ausgemessen werden. Anschließend werden die Messfeilen im Zahn und auf den apikalen Referenzpunkt eingestellt verklebt. Erst danach erfolgt die schonende Extraktion und im Anschluss die histologische Aufarbeitung. Die **Tabelle 2.3** zeigt einige Ergebnisse für *in vivo* Studien zitiert nach Gordon&Chandler [2004].

Studie	Jahr	Gerät	Genauigkeit
Vajrabhaya & Tepmongkol	1997	Root ZX	100%
Pagavino et al.	1998	Root ZX	83%
Dunlap et al.	1998	Root ZX	82%
McDonald et al.	1999	Root ZX	95%
Welk et al.	2003	Root ZX	91%

Tab. 2.3: *In vivo* Genauigkeit von Root ZX, einem Endometriegerät der dritten Generation bei Lokalisation des Foramen apicale, entnommen aus [Gordon&Chandler 2004]. Angegeben wird der Prozentsatz der Messungen im Intervall $\pm 0,5$ mm um das Foramen apicale. Ergebnisse unter 80% werden unterlegt dargestellt.

In Situationen mit nicht geschlossenem Apex oder bei apikalen Resorptionen verlieren Endometer jedoch viel von Ihrer Zuverlässigkeit und zeigen üblicherweise zu kurze Längen an [Hülsmann&Pieper 1989, Kovacevic&Tamarut, 1998]. Bei Anwendung von röntgenologischen Kontrollen helfen jedoch endometrische Messdaten, die Anzahl der notwendigen Röntgenaufnahmen zu reduzieren (Abb. 2.20) [Stock et al. 1997, Brunton et al. 2002].

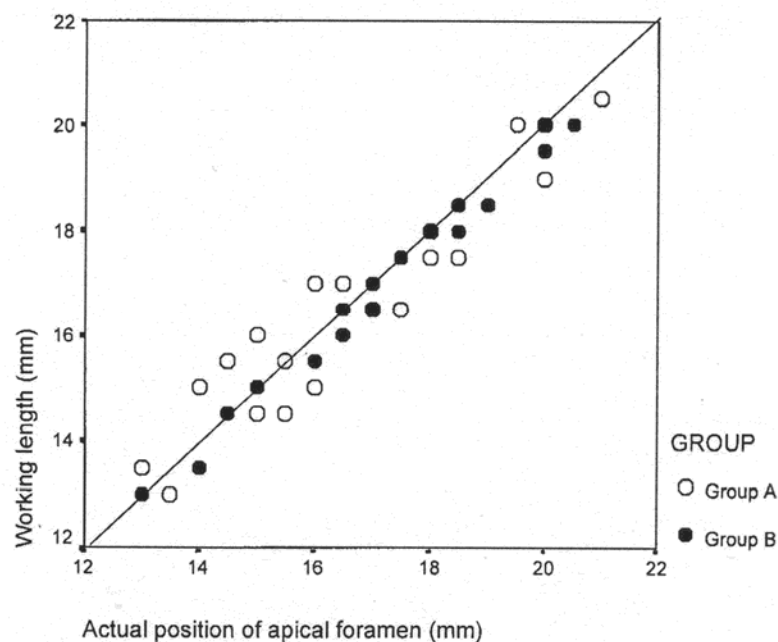


Abb. 2.20: Vergleich von Längenbestimmungen mittels nur röntgenologischer Längenbestimmung (Gruppe A) und kombinierter elektrometrisch-radiologischer Längenbestimmung (Gruppe B) mit dem histologisch korrekten Referenzpunkt [Brunton et al. 2002]. Kombinierte Verfahren sind präziser und reduzieren die Zahl der Röntgenbilder.

3 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Studie ist es, herauszufinden, wie ungenau die Angaben moderner Endometer in einem Bereich von 3mm bis zum Foramen apicale sind und ob sich hier bei verschiedenen aktuellen Geräten unterschiedliche Messcharakteristiken finden lassen. Zusätzlich soll geprüft werden, ob die Dicke der Messelektrode in Bezug auf die Dicke des Wurzelkanals hierbei eine Rolle spielt.

Folgende Nullhypothesen sollen mittels geeigneten statistischen Verfahren überprüft werden:

- Die Genauigkeit des angezeigten Messwertes hängt nicht vom verwendeten Messgerät ab.
- Die Genauigkeit des angezeigten Messwertes hängt nicht von der Dicke der Messelektrode ab.

4 Materialien und Methoden

4.1 Übersicht und Einteilung der Versuchsgruppen

Für die Studie werden an extrahierten menschlichen Zähnen endometrische Messwerte mit den realen Eindringtiefen der Elektrode verglichen. Hierfür werden 4 Endometriegeräte neueren Designs verwendet. Zusätzlich wird für jedes Gerät ein Messvorgang mit einem annähernd klemmenden Instrument (ISO Größe 15) und einem locker im Kanal liegenden Instrument (ISO Größe 10) wiederholt. Es ergibt sich hierbei das in Tab. 4.1 dargestellte Versuchsdesign.

Messgerät/Instrument	Hersteller	ISO 10	ISO 15
Dentaport ZX	Morita	n=20	
Root ZX mini	Morita		
Elements Diagnostic Unit	Sybron Endo		
Raypex 5	VDW		

Tab. 4.1: Versuchsdesign.

4.2 Probenherstellung

4.2.1 Auswahl der Zähne

Für die Studie wurden extrahierte menschliche Zähne mit geraden Wurzeln ausgewählt. Die Zähne wurden in der Abteilung für Kieferchirurgie am MZ für ZMK der Philipps-Universität Marburg und umliegenden zahnärztlichen und kieferchirurgischen Praxen aus zahnmedizinischen (kieferorthopädischen oder chirurgischen) Gründen extrahiert. Die Zähne wurden gesammelt und waren zum Versuchsbeginn nicht älter als 6 Wochen.

Weitere Auswahlkriterien waren ein abgeschlossenes Wurzelwachstum, ein kariesfreier Wurzelbereich und das Fehlen einer endodontischen Vorbehandlung.

Die Zähne wurden nach Extraktion bis zum Zeitpunkt des Versuchsbeginns bei Raumtemperatur in physiologischer Kochsalzlösung (Mat.#1) gelagert.

Für die verwendeten Zähne liegt eine Liste mit dem Einverständnis der betroffenen Patienten vor. Direkt nach der Extraktion wurden die Zähne anonymisiert in den Aufbewahrungsbehälter gelegt.

4.2.2 Vorbereitung der Zähne

Die Zähne wurden zunächst mittels eines Ultraschall-Zahnreinigungsgerätes (Mat.#2), eines Hand-Scalers (Mat.#3) und eines Skalpells (Mat. #4) von Zahnstein, subgingivalen Konkrementen und Gewebsresten befreit. Anschließend wurden die Wurzeln im Bereich der Schmelz-Zementgrenze von der Krone abgetrennt. Hierbei wurde darauf geachtet, dass die Schnittfläche ungefähr im rechten Winkel zur Wurzelachse verlief.

Wurzeln mit einer Länge unter 10 mm wurden verworfen, ebenso Wurzeln mit mehreren Wurzelkanalsystemen, großlumigem oder asymmetrischem Kanalquerschnitt.

20 Zahnwurzeln wurden entsprechend vorbereitet.

4.2.3 Aufbereiten der Wurzelkanäle

Es wurde geprüft, ob alle Wurzelkanäle mit einer K-Feile (Mat. #5) und dem Durchmesser von ISO 15 bis zum Foramen sondiert werden können und die Feile eine leichte Klemmpassung aufweist. Für den Fall, dass der Kanalquerschnitt zu klein war, wurden die Wurzelkanäle mit den Instrumenten der Größen ISO 06,08,10,12,5 (Mat. #5) aufbereitet.

Hiernach wiesen die Wurzeln eine lockere Klemmpassung bei dem Instrument der Größe ISO 15 auf, die Feile ISO 10 lag dagegen locker im Kanallumen.

Mögliche Feilspäne und Gewebereste wurden mit EDTA-Lösung 17% (Mat. #6) und Natriumhypochlorit Lösung 3% (Mat. #7) entfernt. Zum Abschluss wurde das Kanalsystem mit physiologischer Kochsalzlösung (Mat. #1) gespült. Für die Spülvorgänge wurden Einwegspritzen und Endo-Kanülen (Mat. #8) mit dem Durchmesser ISO 30 verwendet.

4.2.4 Bestimmung der Zahnlänge

Unter Mikroskopkontrolle wurde nunmehr eine K-Feile (Mat. #5) der Größe ISO10 unter Mikroskopkontrolle (Vergrößerung ca. 20x) durch einen erfahrenen Endodontologen (Prof. Stoll) so in den Kanal eingebracht, dass die Spitze am Foramen gerade eben sichtbar wurde (Abb. 4.1 und 4.2). Bei einem trichterförmigen Foramen wurde die Spitze des Instrumentes soweit vorgeschoben, dass sie eine gedachte Tangente im Trichtereingang berührt (Abb. 4.2). Die Länge des Instrumentes wurde mit einer Messlehre (Mat. #9) ermittelt und für die betreffende Zahnwurzel als Referenzlänge notiert.



Abb. 4.1: Wurzel mit eingestelltem Referenzinstrument Größe ISO 10. Die Spitze des Instrumentes wurde auf das Foramen apicale eingestellt, der Gummistopper auf die Trennfläche als koronalen Referenzpunkt.

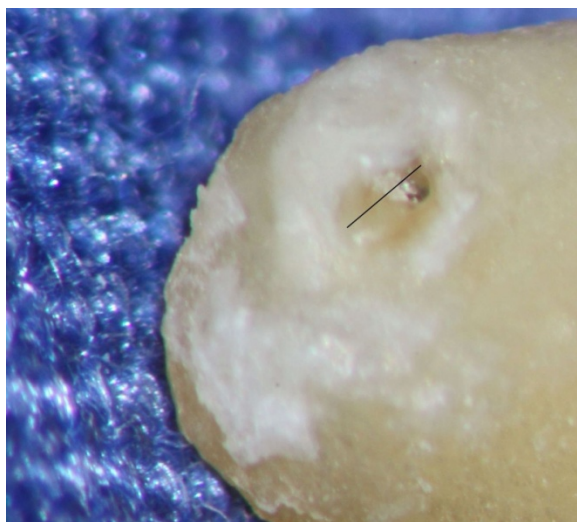


Abb. 4.2: Wurzelspitze im OP-Mikroskop. Die Feilenspitze im trichterförmigen Foramen apicale wurde so weit vorgeschoben, dass sie eine gedachte Verbindungslinie des Trichtereingangs berührt.

4.2.5 Röntgenkontrolle

In die Wurzeln wurde nunmehr ein Silberstift auf die Referenzlänge eingebracht und der Zahn wurde in zwei Ebenen röntgenologisch kontrolliert ([Abb. 4.3](#)). Hierdurch wurde die Lage der Instrumentenspitze am Apex einer weiteren Plausibilitätskontrolle unterzogen.

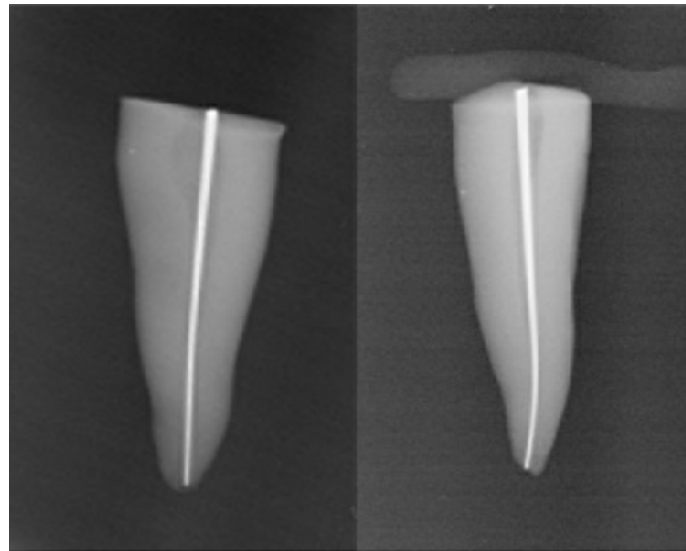


Abb. 4.3: Prüfwurzel Nr. 22 links in mesio-distaler, rechts in vestibulo-oralen Projektion.

4.2.6 Montage der Zähne in die Messvorrichtung

Die Wurzeln wurden nunmehr mit Cyanoacrylat und Autopolymerisat ([Mat. #10](#) und [Mat. #11](#)) so in einen Kunststoff-Objektträger ([Mat. #12](#)) montiert, dass die Wurzelachse senkrecht steht ([Abb. 4.4](#)). Danach wurde ein Standard-Probenrohr ([Mat. #13](#)) so auf den Objektträger geklebt, dass die Zahnwurzel achsial ausgerichtet ist. Auf das offene Ende des Probenrohres wurde nunmehr ein weiterer Objektträger dicht aufgeklebt. Nach Drehen der ganzen Vorrichtung wurde seitlich im oberen Bereich ein kleines Loch zum Befüllen und für die Durchführung der Masselektrode gebohrt. Die fertige Messvorrichtung wurde nun mittels einer 5 ml Spritze und einer Injektionskanüle ([Mat. #8](#)) mit physiologischer Kochsalzlösung ([Mat. #1](#)) befüllt ([Abb. 4.5](#)).

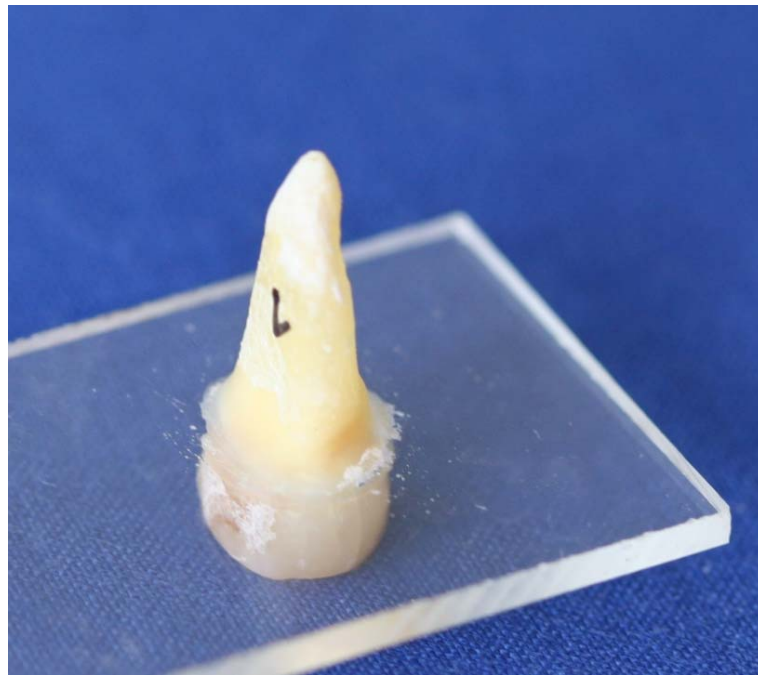


Abb. 4.4: Wurzelspitze im Objektträger montiert.

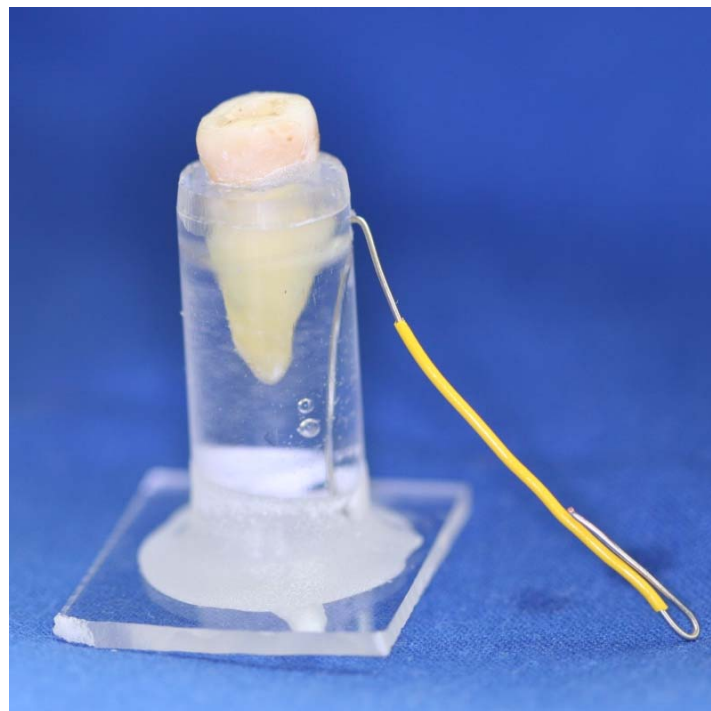


Abb. 4.5: Fertige Messapparatur. Durch die seitliche Öffnung wurde das Prüfrohr mit physiologischer Kochsalzlösung befüllt, danach wurde ein Draht als Masseelektrode durch diese Öffnung eingeführt.

4.3 Messvorgang

Zunächst wurde eine K-Feile ([Mat. #5](#)) der Größe ISO #10 auf folgende Längen in den Kanal eingebracht (RL=Referenzlänge):

RL

RL-0,5mm

RL-1mm

RL-1,5mm

RL-2mm

RL-2,5mm

RL-3mm

Hierzu wurde kontrolliert, ob die unteren 2/3 des Kanals mit Kochsalzlösung gefüllt waren, ggf. wurde hier mit einer Spülspritze mit Buquet-Kanüle ([Mat. #8](#)) nachgefüllt. Die Messwerte des jeweiligen Endometers wurden notiert und zusammen mit der Zahnnummer und der Referenzlänge in eine SPSS-Tabelle eingetragen.

In einem zweiten Messvorgang wurden die oben aufgeführten Punkte durch geeignete Positionierung der Messfeile auf der Skala des jeweiligen Endometers angefahren. Hierbei wurden die jeweiligen Längen des Messinstruments protokolliert und in die Tabelle eingetragen.

4.3.1 Dentaport ZX

Das Gerät Dentaport ZX weist eine fein auflösende Balkenskala auf, die von der Apexanzeige bis weit über den Messwert 3 reicht. Die Messwerte sind deutlich ablesbar ([Abb. 4.6](#)).

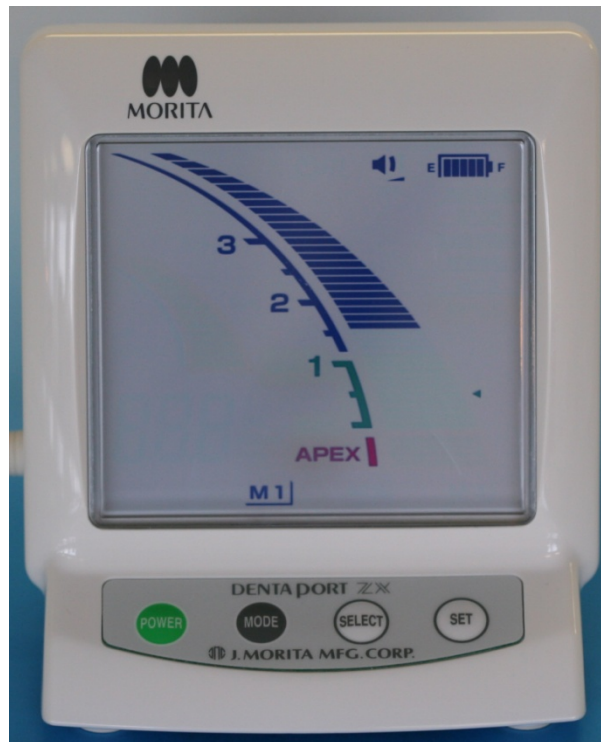


Abb. 4.6: DentaPort ZX von Firma Morita. Fein auflösende Balkenskala, Apexanzeige und Skala bis über den Anzeigewert 3. Messwert hier: 1,5.



Abb. 4.7: Root ZX mini von Firma Morita. Fein auflösende Balkenskala, Apexanzeige und Skala bis über den Anzeigewert 3. Messwert hier: 1,5. Eine zusätzliche numerische Anzeige für die Anzahl der Messbalken bis zum Nullwert wird links davon eingeblendet.

4.3.2 Root-ZX Mini

Das Gerät Root ZX mini zeigt im Vergleich zum Dentaport ZX die gleiche Displayskala an (Abb. 4.7). Hinzu kommt die Anzeige eines numerischen Wertes links im Display. Diese gibt die Entfernung zum Apex in Messbalken (ca. 0,25 mm) an.

4.3.3 Elements Diagnostic Unit

Das Gerät Elements Diagnostic Unit zeigt den gemessenen Wert gleich auf drei Skalen und einem zusätzlichen mobilen Satellitenmodul an (Abb. 4.8). Als genaueste Anzeige wird die numerische Anzeige mit einem Messbereich von -0,5 mm bis +3,0 mm in Schritten von 0,1 mm spezifiziert.



Abb. 4.8: Elements Diagnostic Unit von Firma Sybron Endo. Fein auflösende Balkenskala, ab der Apexanzeige (0) bis zum Anzeigewert 3 (rechts). Die Länge wird zusätzlich durch eine Digitalanzeige (oben) dargestellt. Messwert hier: 1,4. Eine zusätzliche Satellitenanzeige kann in der Nähe des OP-Felds platziert werden (kleines Bild links unten).

4.3.4 VDW: Raypex 5

Das Gerät Raypex5 der Firma VDW zeigt den gemessenen Wert auf einer grob gegliederten Balkenanzeige für den apikalen Abschnitt und einer zweiten Anzeige für den koronalen und mittleren Kanalanteil. Hierbei ist die Skala nicht nach Zahlenwerten unterteilt, sondern nach farbig markierten Bereichen (Abb. 4.9).

Die Interpretation der Ablesung entspr. der Anweisung des Herstellers besagt, dass die Anzeige des roten Segments dem Foramen apicale entspricht, der gelbe Bereich ist entspricht der „Region in der Nähe des Foramen apicale“, der grüne Bereich entspricht dem Bereich der „apikalen Konstriktion“ und der blaue Bereich dem Beginn der apikalen Region [VDW 2005].

In Vorversuchen wurde die Skala anhand mehrerer Zähne überprüft und für die Hauptversuche wurden die farbigen Bereiche den Abständen entspr. Tabelle 4.2 zugeordnet.

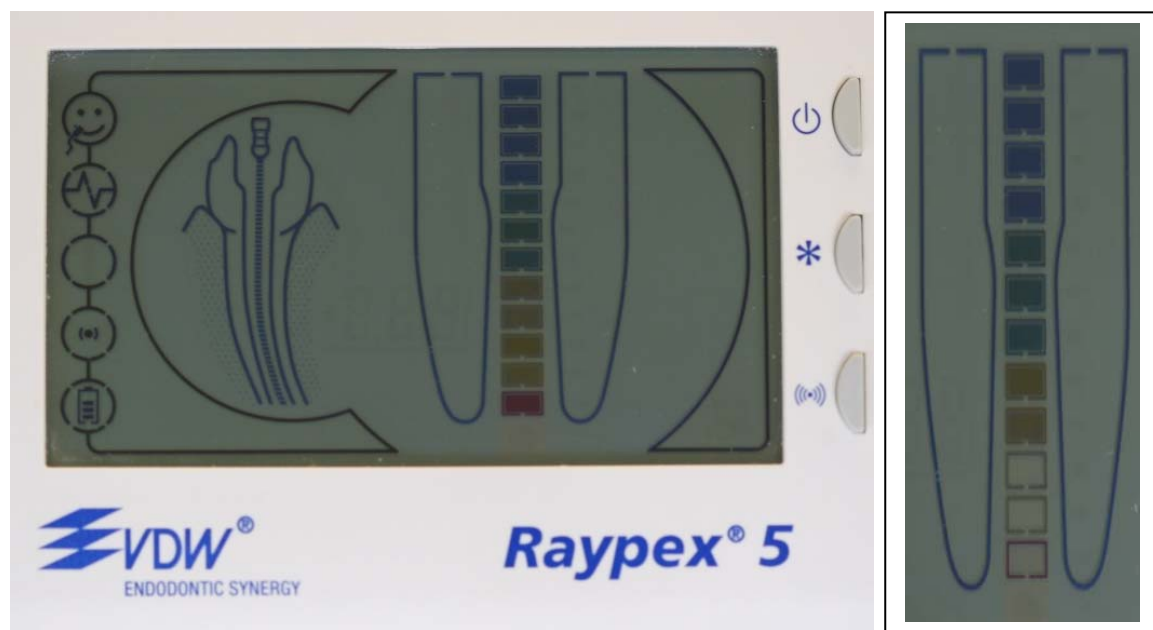


Abb. 4.9: Raypex 5 von Firma VDW. Grob aufgelöste Balkenskala, ab der Apexanzeige (rot). Die Skala wird in drei farblich gekennzeichnete Bereiche untergliedert (gelb, grün, blau). Im rechten Bild sieht man eine Messung in der Mitte des gelben Bereiches.

Messgerät/Instrument	Interpretation	Ablesung
Roter Balken	Foramenapicale	0,0 mm
Mitte des gelben Bereichs	Region in der Nähe des Foramenapicale	0,5 mm
Mitte des grünen Bereichs	Apikale Konstriktion	1,0 mm
Mitte des blauen Bereichs	Beginn der apikalen Region	2,0 mm

Tab. 4.2: Umsetzung der Skalenanzeige des Raypex 5 in geschätzte Abstände vom Foramen apicale.

4.4 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Daten wurde mit dem Programm SPSS 15 vorgenommen ([Mat.#14](#)). Die deskriptive Auswertung erfolgte in Tabellenform.

Zur Überprüfung der Verteilungseigenschaften wurde der Test auf Normalverteilung von Kolmogoroff-Smirnov auf einem Signifikanzniveau $p=0,05$ verwendet. Die Überprüfung auf Varianzhomogenität erfolgte mit dem Levene-Test auf einem Signifikanzniveau von $p=0,05$.

Für die vergleichende Auswertung der Gruppen wurde eine mehrfaktorielle Varianzanalyse (Signifikanzniveau von $p=0,05$) sowie Darstellungen der Messkurven als Scatterplot mit eingezeichneten Regressionsgeraden gewählt. Zusätzlich wurden die Ergebnisse als Bland-Altman Plots dargestellt.

5 Ergebnisse

5.1 Fehlende Messwerte

Untersucht wurden $n=20$ Zahnwurzeln mit jeweils 2 Messfeilen und jeweils 4 Messgeräten. Je Wurzel wurden 7+7 Positionen vermessen, dies ergibt eine Anzahl von 280 Messpunkten je Gruppe (a 20 Wurzeln). Da nicht jedem Messpunkt ein eindeutiger Messwert zugeordnet werden konnte, wurden die betreffenden Messwerte als fehlend klassifiziert. Die Anzahl der fehlenden Messwerte gibt [Tabelle 5.1](#) an.

Messelektrode	Messgerät	Gültig	Fehlend
10	Dentaport-ZX	243 (86,8%)	37 (13,2 %)
	Root-ZX mini	227 (81,1 %)	53 (18,9 %)
	Elements diagnostic	184 (65,7 %)	96 (34,3%)
	Raypex 5	210 (75,0 %)	70 (25,0 %)
15	Dentaport-ZX	253 (90,4 %)	27 (9,6%)
	Root-ZX mini	253 (90,4 %)	27 (9,6 %)
	Elements diagnostic	218 (77,9 %)	62 (22,1 %)
	Raypex 5	230 (82,1 %)	50 (17,9 %)

Tab. 5.1: Anzahl und prozentualer Anteil der gültigen und fehlenden Messwerte.

5.2 Verteilung und Varianzhomogenität

Die Variable „Reading“ als abhängige Variable wurde mit dem Kolmogoroff-Smirnoff Test auf Normalverteilung hin untersucht. Hierbei ergab sich bei allen Versuchsgruppen ein Ergebnis von $p < 0.001$. Es liegt somit keine Normalverteilung vor.

Die Prüfung auf Varianzhomogenität zwischen den verschiedenen Gruppen mit dem Levene-Test zeigt ebenfalls, dass diese nicht angenommen werden kann.

5.3 Messgenauigkeit am apikalen Referenzpunkt

Die Messgenauigkeit der einzelnen Geräte am Referenzpunkt kann durch die Messergebnisse bei Lage der Messelektrode am Referenzpunkt beschrieben werden.

Tab. 5.2 gibt Mittelwert und Standardabweichung der Ablesewerte an.

Weiterhin wurde geprüft, wie viele Messungen bei Ablesewert 0 eine Feilenposition innerhalb eines Bereiches von $\pm 0,5$ mm um den realen apikalen Referenzpunkt ergeben.

Die Tab. 5.3 zeigt die Ergebnisse als Prozentwert an.

Messelektrode	Messgerät	Mittelw. (mm)	Stdabw.
#10	Dentaport-ZX	0.20	0.31
	Root-ZX mini	0.21	0.39
	Elements diagnostic	0.08	0.51
	Raypex 5	0.05	0.16
#15	Dentaport-ZX	0.01	0.34
	Root-ZX mini	0.13	0.28
	Elements diagnostic	0.38	0.42
	Raypex 5	0.06	0.17

Tab. 5.2: Ablesewerte bei Position der Messelektrode am Referenzpunkt.

Messelektrode	Messgerät	Genauigkeit ($\pm 0,5$ mm)
#10	Dentaport-ZX	97,4 %
	Root-ZX mini	95,0 %
	Elements diagnostic	86,2 %
	Raypex 5	82,4 %
#15	Dentaport-ZX	97,6 %
	Root-ZX mini	93,4 %
	Elements diagnostic	84,8 %
	Raypex 5	87,2 %

Tab. 5.3: Genauigkeit als Prozentsatz der erfolgreichen Messungen im Intervall $\pm 0,5$ mm um den apikalen Referenzpunkt.

5.4 Deskriptive Darstellung der Ergebnisse

Zunächst wurden die Ergebnisse getrennt für die einzelnen Gruppen als Scatterplot der Messwerte gegen die Eindringtiefe dargestellt (Abb. 5.1-5.4). Die Eindringtiefe wurde als Abstand des Messinstruments zum vorher vom Experten festgelegten Referenzpunkt angegeben. In die einzelnen Scatterplots wurden Ausgleichsgeraden gelegt.

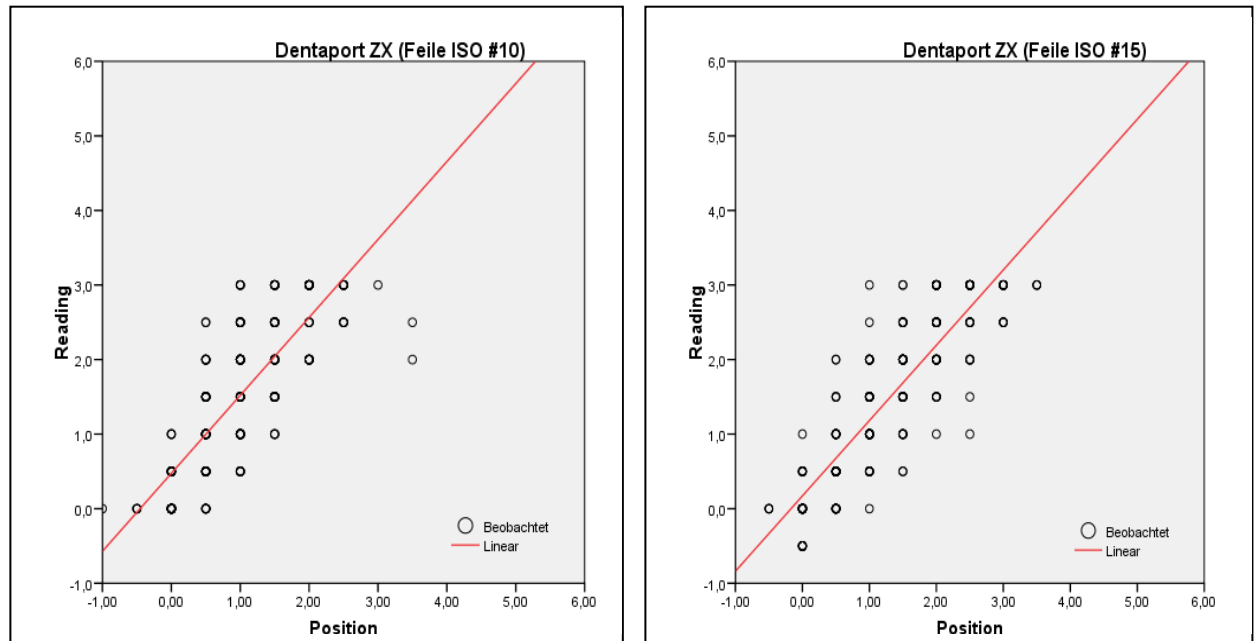


Abb. 5.1: Lineare Regression für das Gerät DentaportZX.

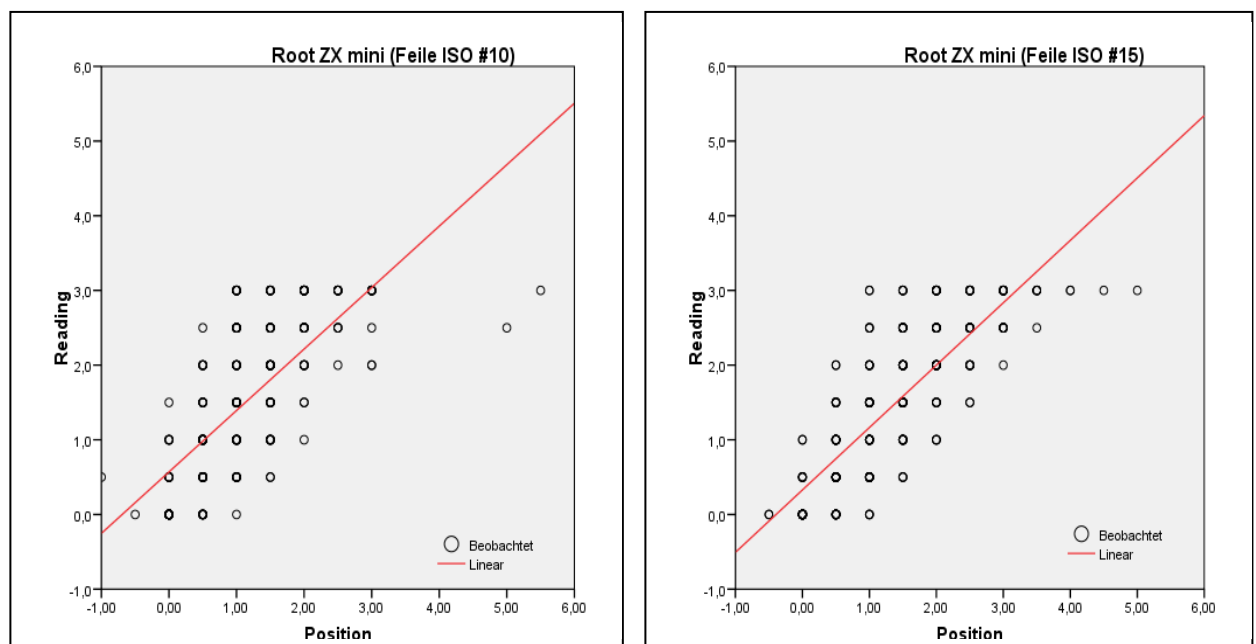


Abb. 5.2: Lineare Regression für das Gerät Root ZX mini.

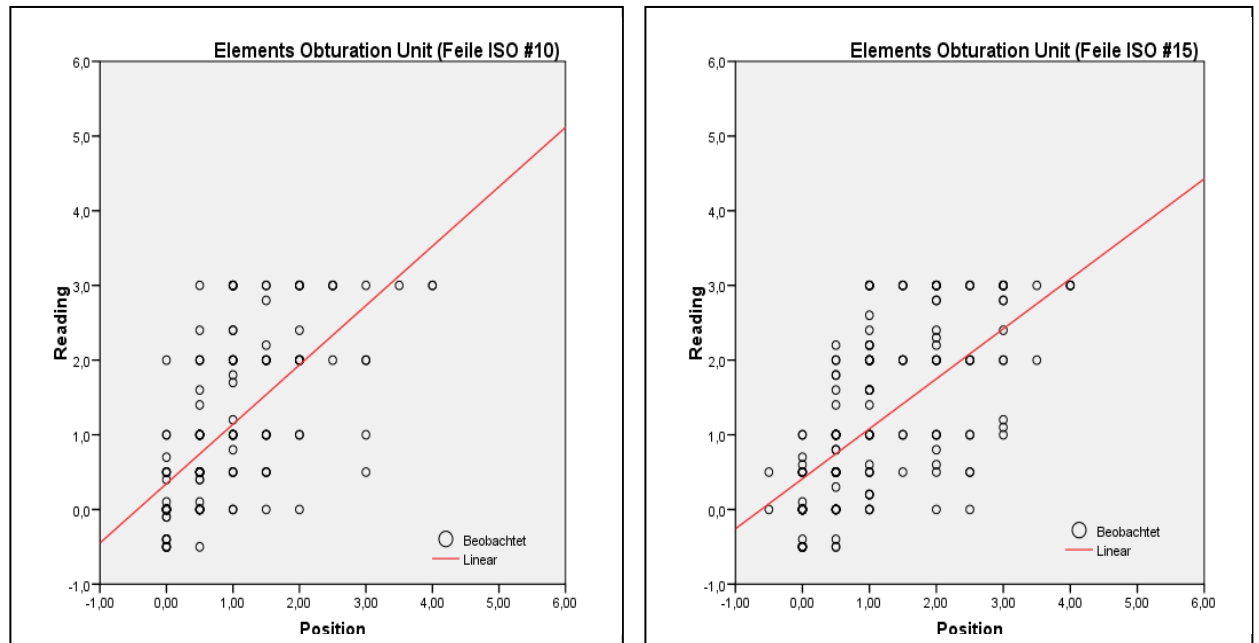


Abb. 5.3: Lineare Regression für das Gerät Elements Obturation Unit.

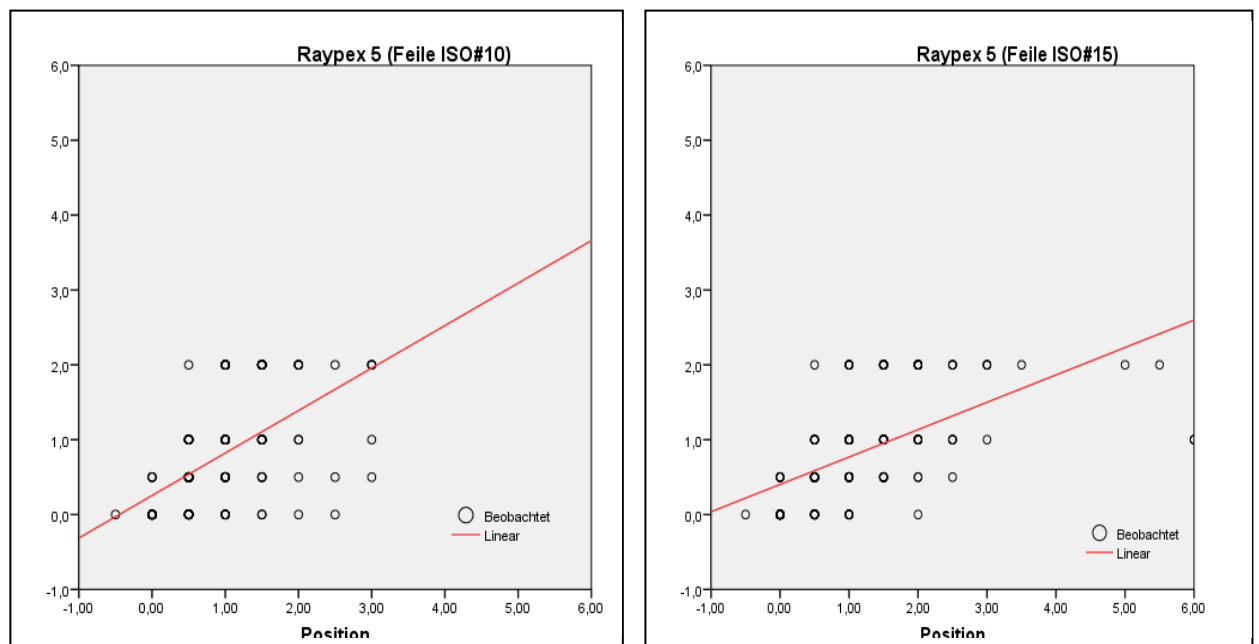


Abb. 5.4: Lineare Regression für das Gerät Raypex 5.

Für die Ausgleichsgeraden wurden in [Tabelle 5.4](#) der Koeffizient (b_1), die Konstante (b_0) sowie das Bestimmtheitsmaß der Regression (R-Quadrat) eingetragen.

Messelektrode	Messgerät	b0 (Konstante)	b1 (Steigung)	R-Quadrat
10	Dentaport-ZX	0,474	1,045	0,629
	Root-ZX mini	0,569	0,823	0,531
	Elements diagnostic	0,346	0,795	0,419
	Raypex 5	0,254	0,568	0,316
15	Dentaport-ZX	0,171	1,010	0,747
	Root-ZX mini	0,328	0,836	0,659
	Elements diagnostic	0,410	0,669	0,434
	Raypex 5	0,403	0,366	0,364

Tab. 5.4: Lineare Kurvenanpassung in den einzelnen Gruppen.

Zum Vergleich zweier Messmethoden eignen sich Regressionsgeraden nur bedingt [Bland&Altman 1986]. Üblich ist hier ein Diagramm der Differenzen beider Messmethoden zu den Mittelwerten beider Methoden in einem kartesischen Koordinatensystem. Bland-Altman Diagramme werden vor allem für den Vergleich von neuen Messmethoden gegen bestehende Standards eingesetzt, die möglicherweise auch fehlerbehaftet sind. Hierbei wird die Differenz der Messwerte aus den beiden Verfahren als „best guess“ verwendet. Hierzu wurden in der SPSS-Tabelle zwei neue Variablen berechnet. Die Variable „Diff“ bildet die Differenz „Reading – Position“, die Variable „Mean“ bildet den Mittelwert zwischen Reading und Position. Abb. 5.5-5.8 zeigen die Bland-Altman Diagramme der einzelnen Gruppen.

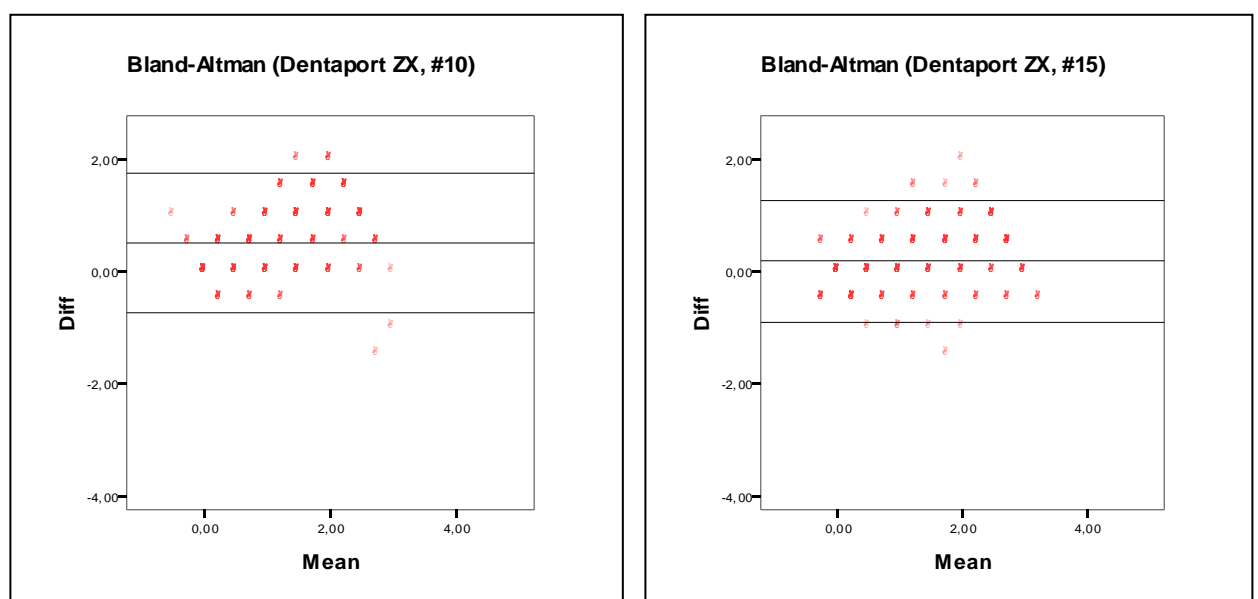


Abb. 5.5: Bland-Altman Plot für das Gerät Dentaport ZX. Die Variable „Diff“ bildet die Differenz „Reading – Position“, die Variable „Mean“ bildet den Mittelwert zwischen Reading und Position.

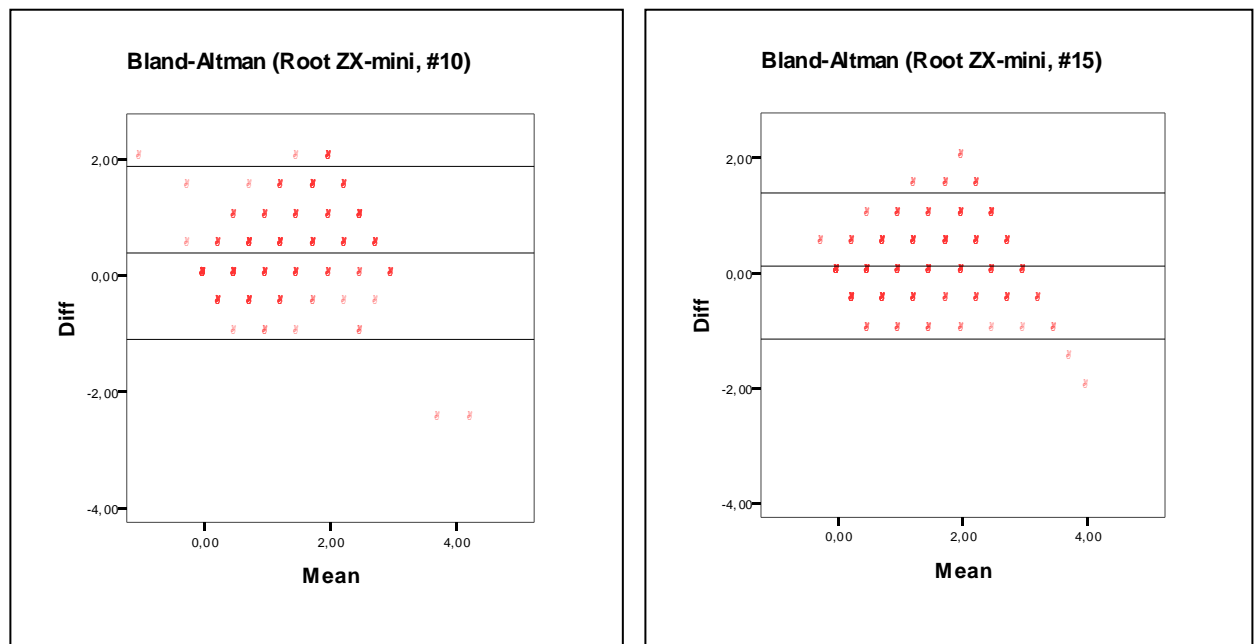


Abb. 5.6: Bland-Altman Plot für das Gerät Root ZX mini. Die Variable „Diff“ bildet die Differenz „Reading – Position“, die Variable „Mean“ bildet den Mittelwert zwischen Reading und Position.

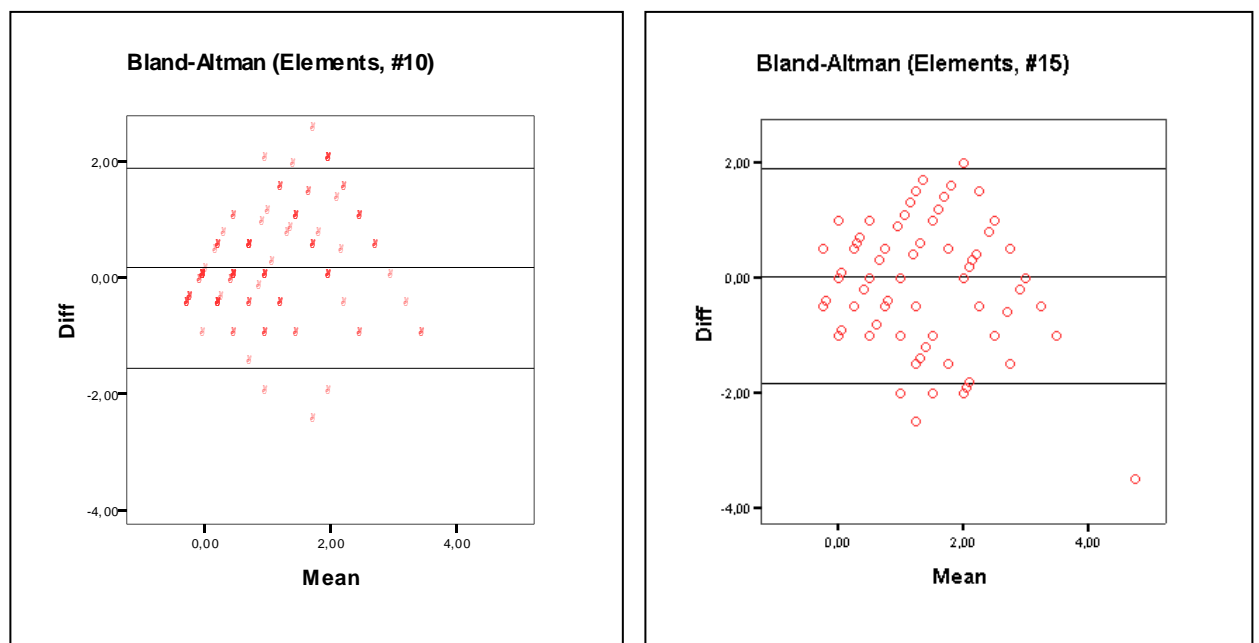


Abb. 5.7: Bland-Altman Plot für das Gerät Elements Obturation Unit. Die Variable „Diff“ bildet die Differenz „Reading – Position“, die Variable „Mean“ bildet den Mittelwert zwischen Reading und Position.

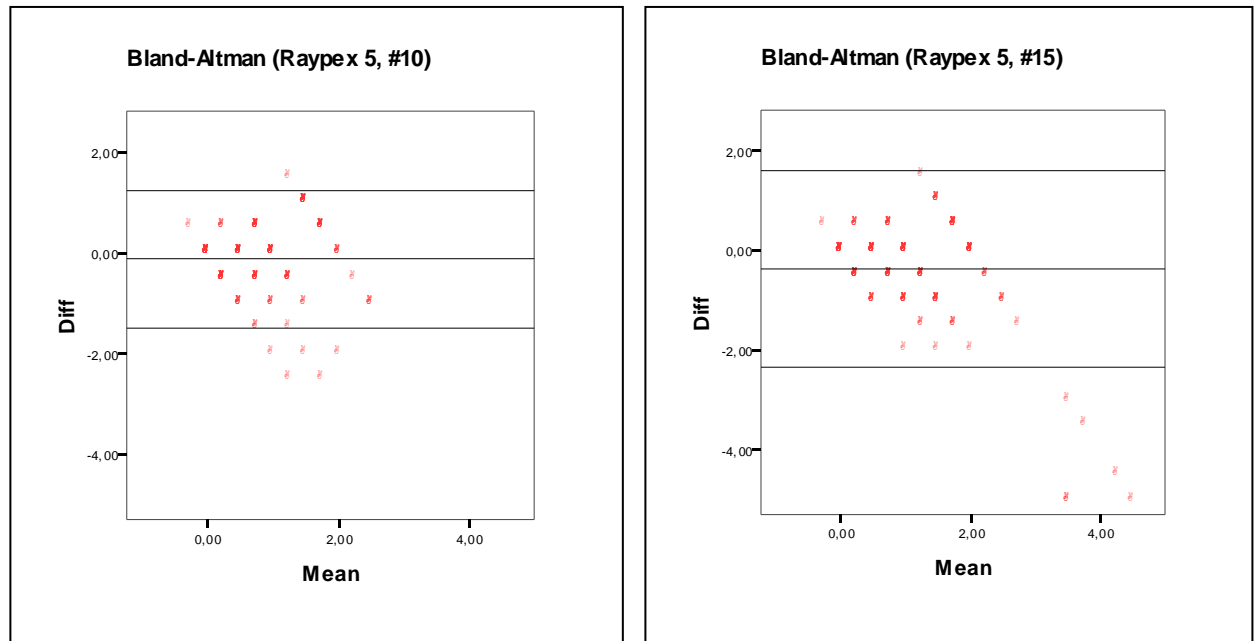


Abb. 5.8: Bland-Altman Plot für das Gerät Raypex 5. Die Variable „Diff“ bildet die Differenz „Reading – Position“, die Variable „Mean“ bildet den Mittelwert zwischen Reading und Position.

Die Bland-Altman Diagramme enthalten jeweils drei Referenzlinien für den Mittelwert der Differenzen (mittlere Linie) sowie jeweils plus/minus die zweifache Standardabweichung der Differenzen (obere und untere Linie). Die vorliegenden Diagramme wurden in SPSS manuell über die Funktion „IGraph“ erzeugt, da es in SPSS keine standardisierte Routine für Bland-Altman Diagramme gibt.

Zur Vorbereitung einer Hypothesenprüfung wurden die Mittelwerte und Standardabweichungen der Messwerte (Variable „Reading“) in Abhängigkeit der Feilenposition (Variable „Position“) aufgetragen. Diese Diagramme sind in [Abb. 5.9-5.12](#) eingetragen.

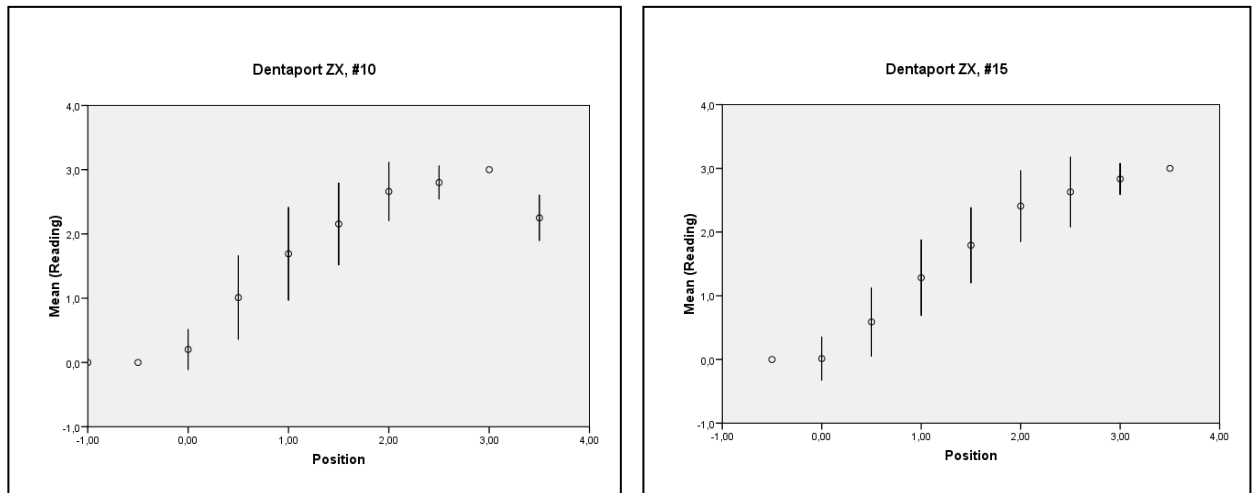


Abb. 5.9: Mittelwerte und Standardabweichungen von „Reading“ gegen die Feilenposition für das Gerät Dentaport ZX.

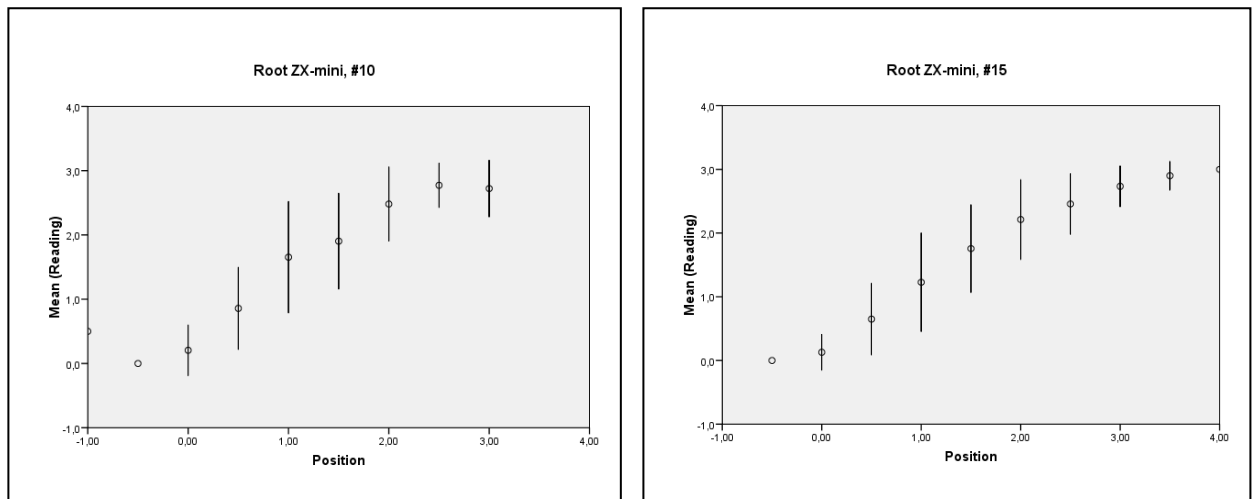


Abb. 5.10: Mittelwerte und Standardabweichungen von „Reading“ gegen die Feilenposition für das Gerät Root ZX mini.

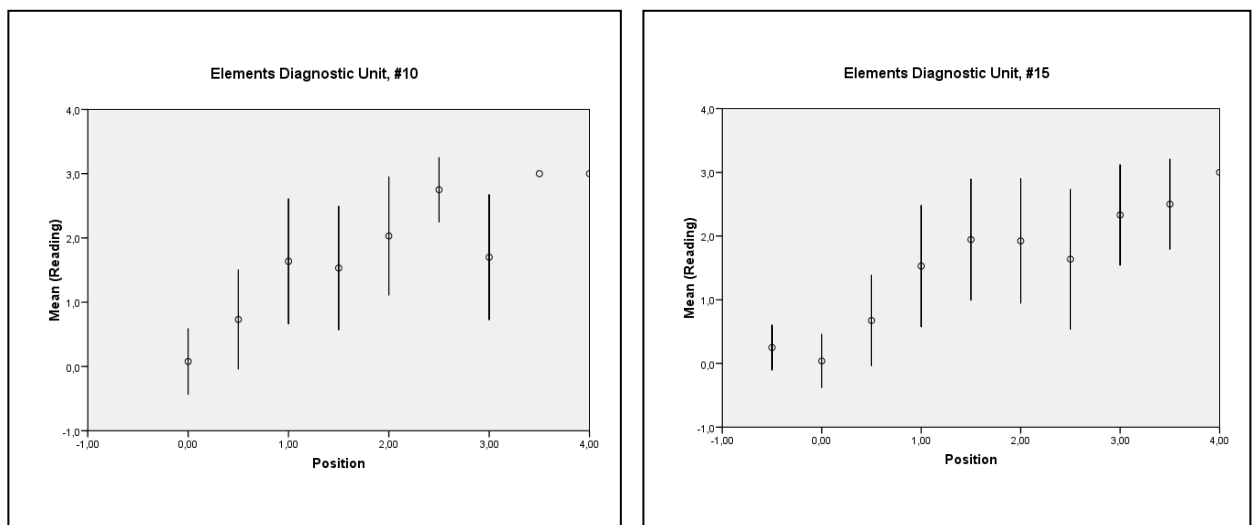


Abb. 5.11: Mittelwerte und Standardabweichungen von „Reading“ gegen die Feilenposition für das Gerät Elements Obturation Unit.

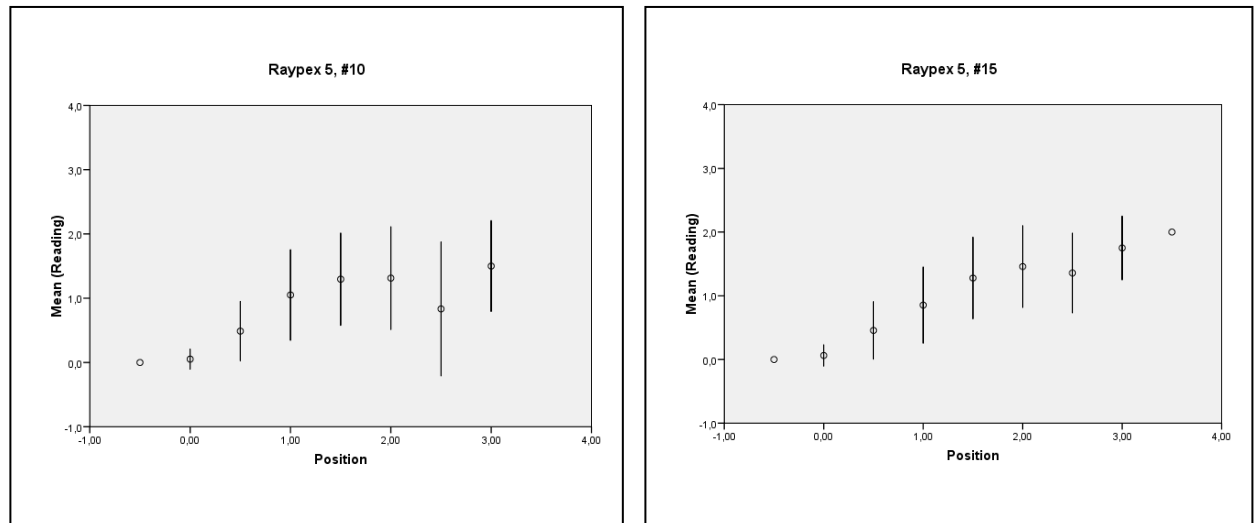


Abb. 5.12: Mittelwerte und Standardabweichungen von „Reading“ gegen die Feilenposition für das Gerät Raypex 5.

5.5 Hypothesenprüfung

Zur Hypothesenprüfung wurde die SPSS-Datei nach der Variable „Position“ sortiert. Auf jedem Messniveau wurde nunmehr zunächst ein Kruskal-Wallis Test (Signifikanzniveau $p=0.05$) durchgeführt. Hierbei wurde zunächst das Messgerät (Parameter „Device“) als Gruppe getestet (Tab. 5.5), dann wurde für jedes Messgerät die Feilendicke (Parameter „File“) als Gruppenvariable verwendet (Tab. 5.6).

„Position“	Feile #10	Feile #15
0	0,038	0,465
0,5	0,000	0,436
1	0,001	0,003
1,5	0,000	0,016
2	0,000	0,000
2,5	0,026	0,000
3	0,020	0,008

Tab. 5.5: p-Werte aus dem Kruskal-Wallis Test der Messwerte auf unterschiedlichen Eindringtiefen (Signifikanzniveau=0.05) bei beiden Messfeilen.

Position	Dentaport ZX	Root ZX mini	Elements	Raypex 5
0	0,012	0,489	1,000	0,794
0,5	0,001	0,113	0,913	0,722
1	0,004	0,017	0,699	0,274
1,5	0,014	0,365	0,329	0,847
2	0,056	0,086	0,807	0,685
2,5	0,674	0,071	0,104	0,383
3	0,769	0,861	0,208	0,730

Tab. 5.6: Mann-Whitney Test der Messwerte auf unterschiedlichen Eindringtiefen (Signifikanzniveau=0.05) bei den verschiedenen Messgeräten.

Die Graphiken 5.13 und 5.14 zeigen die Entwicklung der Messwerte in Abhängigkeit der Eindringtiefen für alle Messdaten aufgeteilt nach Gerät (Abb. 5.13) und nach Dicke der Messfeile (Abb. 5.14).

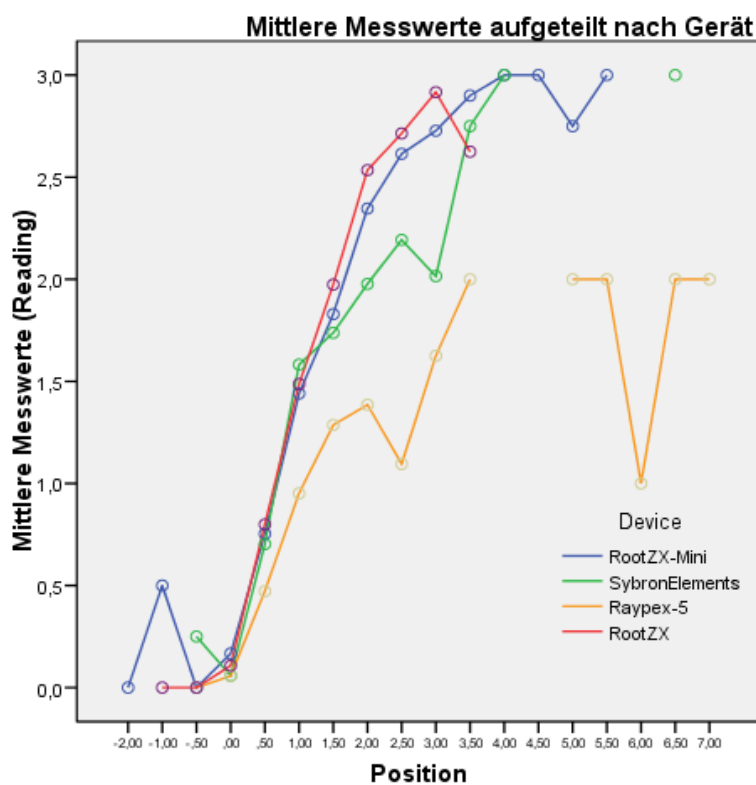


Abb. 5.13: Mittlere Messwerte in Abhängigkeit der Eindringposition aufgeteilt nach Messgeräten.

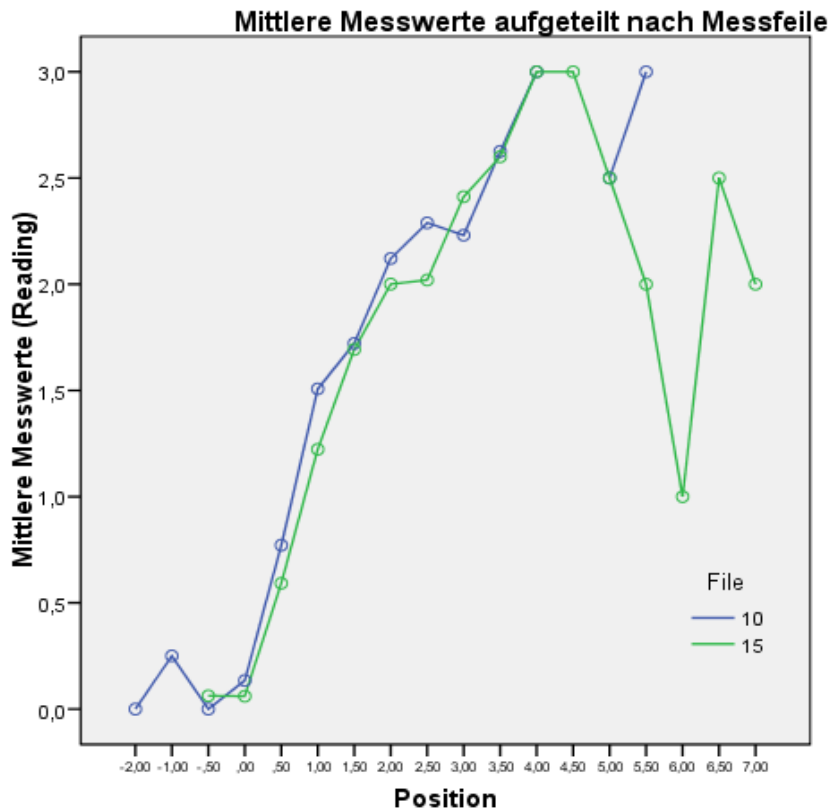


Abb. 5.14: Mittlere Messwerte in Abhängigkeit der Eindringposition aufgeteilt nach Messfeilendurchmesser.

5.5.1 Erste Hypothese

Die Genauigkeit des angezeigten Messwertes hängt nicht vom verwendeten Messgerät ab.

Beim Vergleich der verschiedenen Geräte auf unterschiedlichen Eindringtiefen wurden bis auf drei Gruppen signifikante Unterschiede auf allen Messtiefenniveaus gefunden. [Abb. 5.13](#) zeigt, dass sich hierbei insbesondere das Gerät Raypex 5 anders verhält, als die übrigen getesteten Geräte.

Die erste Hypothese ist daher **abzulehnen**.

5.5.2 Zweite Hypothese

Die Genauigkeit des angezeigten Messwertes hängt nicht vom Durchmesser der Messelektrode ab.

Für die Geräte Root ZX mini, Elements Diagnostic Unit und Raypex 5 konnte nur eine Gruppe mit einem statistisch signifikanten ($p=0.05$) Unterschied gefunden werden. Lediglich in der Gruppe Dentaport ZX waren 4 Prüfgruppen für die Eindringtiefen 0-1,5 mm signifikant unterschiedlich. Abb. 5.9 zeigt, dass hier das Foramen mit der Feile #15 sicherer detektiert werden konnte.

Die zweite Hypothese ist daher für die drei Geräte Root ZX mini, Elements Diagnostic Unit und Raypex 5 anzunehmen, lediglich für das Gerät Dentaport ZX muss die Hypothese für den apexnahen Bereich **abgelehnt** werden.

6 Diskussion

6.1 Material und Methode

Die Genauigkeit von elektronischen Endometern wurde bislang in vielen Studien untersucht [[Gordon&Chandler 2004](#), [Ingle&Bakland 2002](#)]. Endometer zeigen hier eine hohe Erfolgsrate bei der Bestimmung der Arbeitslänge [[Plotino et al. 2006](#), [Guise et al. 2009](#)].

Beim Studiendesign kann man unterscheiden zwischen klinischen *in vivo* Studien am Patienten [[Haffner et al. 2005](#), [Kim et al. 2008](#), [Özsezer et al. 2007](#), [Shabahang et al. 1996](#), [Siu et al. 2009](#), [Tselnik et al. 2005](#), [Welk et al. 2003](#)] und *in vitro* Studien am extrahierten Zahn [[Briseño-Marroquin et al. 2008](#), [Brunton et al. 2002](#), [Janolio de Camargo et al. 2009](#), [Goldberg et al. 2008](#), [Guise et al. 2009](#), [Herrera et al. 2007](#), [Higa et al. 2009](#), [Hör et al. 2005](#), [Jenkins et al. 2001](#), [Pascon et al. 2009](#), [Plotino et al. 2006](#), [Plotino et al. 2006](#), [Thomas et al. 2003](#), [Venturi&Breschi 2007](#), [Versiani et al. 2009](#), [Wrbas et al. 2007](#)]. Bei *in vivo* Studien wird zumeist eine Messung im lebenden Patienten durchgeführt und der Zahn dann mit einem fixierten Referenzstift extrahiert, um die Präzision der Apexlokation mittels histologischen Aufarbeitungstechniken zu untersuchen [[Siu et al. 2009](#), [Tselnik et al. 2005](#), [Welk et al. 2003](#)].

6.1.1 Eigener Versuchsaufbau am extrahierten Zahn

6.1.1.1 Die Verwendung von extrahierten Zähnen

Extrahierte Zähne bieten für eine elektrometrische Messung günstige Voraussetzungen, da sie die anatomischen Bedingungen im Wurzelkanal genau wiedergeben. Lediglich der Elektrolyt und die Umgebung (Parodontalraum und Knochen) müssen in einem geeigneten Modell simuliert werden. Hierzu werden die extrahierten Zähne meist in eine Modellumgebung mit leitfähigem Material z.B. aus Agar Agar [[Briseño-Marroquín et al. 2008](#)], Alginat [[Herrera et al. 2007](#)], Gelatine [[Guise et al. 2009](#)], oder physiologischer Kochsalzlösung [[Ibarrola et al. 1999](#), [Brunton et al. 2002](#), [Hör et al. 2005](#), [Goldberg et al. 2008](#)] eingestellt.

In der vorliegenden Studie wurden relativ frisch extrahierte Zähne verwendet. Die abgesetzten Wurzeln wurden in einem Probenrohr so einmontiert, dass die Wurzelspitze zentral und frei in einer physiologischen Kochsalzlösung eintaucht. Es konnte

nachgewiesen werden, dass die Verwendung von Kochsalzlösung als Elektrolyt zu verlässlichen und reproduzierbaren Messungen führt [Hör et al. 2005, Venturi&Breschi 2007].

Durch die Auswahl von geraden Wurzeln mit nur einem möglichst runden Kanalsystem werden die elektrochemischen Bedingungen im Kanalsystem vereinfacht. Die Abtrennung von Zahnkrone und evtl. anderen Wurzeln verhindert die Bildung von Nebenstromkreisen, die das Messergebnis verfälschen können. Die konische Aufarbeitung des oberen Wurzeldrittels (sogen. „preflaring“) erhöht die Präzision der Messungen [Janolio de Camargo et al. 2009, Ibarrola et al. 1999].

6.1.1.2 Apikaler Referenzpunkt

Als apikaler Referenzpunkt für *in vitro* Studien werden normalerweise das Foramen apicale [Guise et al. 2009] oder die apikale Konstriktion [Ibarrola et al. 1999] verwendet. *In vivo* konnte eine Messgenauigkeit von 0.3 mm als Differenz zwischen der mit Endometrie bestimmten realen Feilenposition und der anatomischen Zielposition bestimmt werden [Haffner et al. 2005]. Hierbei konnte jedoch die apikale Konstriktion nur in 45% [Haffner et al. 2005] aller Messungen bis hin zu 90.7% der Messungen [Welk et al. 2003] lokalisiert werden. Dementsprechend ist das apikale Foramen ein sicherer und reproduzierbarer Referenzpunkt für eine *in vitro* Studie [Venturi&Breschi 2007].

6.1.1.3 Messvorgang

Bei *in vitro* Studien wird normalerweise die Präzision der Detektion des apikalen Referenzpunktes bestimmt, indem die Messfeile endometrisch auf diesen Punkt eingestellt wird und das Ergebnis anhand der vorher mikroskopisch bestimmten Länge verglichen wird oder indem die Lage der Feilenspitze mikroskopisch analysiert wird.

Die Bestimmung einer Messkurve, welche auch den Bereich vor dem Apex in die Messung einbezieht, erfolgt durch Messen von verschiedenen Punkten auf der Messkurve. In der Studie von Higa et al. wurden hier die Positionen 0, 0.5, 1, 2, 3 und 4 mm vor dem Apex endometrisch gemessen und der Anzeigewert des Endometers notiert [Higa et al. 2009]. In der vorliegenden Arbeit wurden Messwerte mit Abständen von 0.5 mm bis zu einer Distanz von 3 mm ermittelt. Zusätzlich wurden die Feilenpositionen notiert, welche einen Ausschlag am Endometer für die betreffenden Abstandswerte erzeugen. Hierdurch werden zusätzliche Punkte auf der gleichen Messkurve erfasst und für die statistische Auswertung bereitgestellt.

6.1.1.4 Fehlende Messwerte

Obgleich darauf geachtet wurde, dass in der Versuchsanordnung genügend Elektrolyt im Wurzelkanal vorhanden war und das Foramen apicale offen (patency) war, also ein freier Fluss von Ionen im Messkreis möglich war, konnten nicht für alle Feilenpositionen Messwerte erhoben werden. Dies trat gehäuft bei größerer Entfernung der Messfeile vom Foramen apicale auf. Das Endometer lieferte hier entweder keinen Ausschlag oder in einzelnen Fällen eine stark „springende“ Ablesung. In diesen Fällen wurde der Messwert in der vorliegenden Studie als fehlend eingetragen. Solche „unstable“ Messungen wurden von [Venturi&Breschi](#) insbesondere für das Gerät Root ZX berichtet. *In vitro* wurden 4.2% der Messungen als „unstable“ bezeichnet [[Venturi&Breschi 2007](#)], *in vivo* wurden 20.9% der Messungen als „unstable“ klassifiziert [[Venturi&Breschi 2005](#)]. In unserer Studie wurden (siehe Tab. 5.1) für Dentaport ZX und Root ZX mini zwischen 9.6 und 18.9 % fehlende Werte notiert. Besonders viele fehlende Messwerte wurden bei den Geräten Elements Diagnostic Unit (22.1%-34.3%) und Raypex 5 (17.9%-25.0%) festgestellt.

6.1.2 Statistische Auswertung

6.1.2.1 Konventionelle Bestimmung der Messgenauigkeit am apikalen Referenzpunkt

In klassischen Studien zur Genauigkeit von Endometern wird bestimmt, mit welcher Messgenauigkeit der apikale Referenzpunkt identifiziert werden kann. Hierzu wird zumeist der Prozentsatz an Messungen angegeben, die in einem Intervall um die wahre Position liegen. Als Intervall wird hier zumeist das Intervall -0.5 bis 0.5 mm um den Referenzpunkt (0.0 mm) verwendet. In der vorliegenden Studie wurde sowohl diese Methode (zum Vergleich mit den Literaturstudien), als auch die Bestimmung von realer Position am Gerätereferenzpunkt (wenn das Messgerät die Position 0.0 mm anzeigt) als Mittelwert mit Standardabweichung angegeben. Zusätzlich wurde in den ermittelten Ausgleichsgeraden für die Messfunktion der y-Achsenabschnitt als Parameter der Regressionsgleichung ermittelt. Auch dieser Parameter kann als Aussage über die Genauigkeit der einzelnen Geräte/Elektroden Konfigurationen verwendet werden.

Die Ergebnisse der Messgenauigkeit am apikalen Referenzpunkt wurden gesammelt und diskutiert, um die bestehende Versuchsanordnung hinsichtlich ihrer Messgenauigkeit mit klassischen Versuchsaufbauten vergleichen zu können.

6.1.2.2 Charakterisierung der Messkurven jenseits des apikalen Referenzpunkts

Fragestellung der vorliegenden Arbeit ist die Genauigkeit der Messwerte in Bereichen 0-3 mm koronal des apikalen Referenzpunktes. Hierzu wurden bei n=20 Zähnen Messkurven aufgenommen und als Grafiken mit Mittelwert und Standardabweichung an den einzelnen Meßpunkten dargestellt. Dies ermöglicht die Verwendung von Methoden der testenden Statistik als Verfahren zur Hypothesenprüfung. Hier wurden nichtparametrische Methoden verwendet, da weder Normalverteilung, noch Varianzhomogenität angenommen werden konnten.

Für die statistische Auswertung wurden zusätzlich Regressionsgeraden berechnet und als Grafiken dargestellt. Ausgangspunkt für die Verwendung von Regressionsgeraden ist die Annahme, dass nahe dem apikalen Referenzpunkt die als sigmoidal zu erwartende Messkurve einen hinreichend linearen Abschnitt aufweist (siehe [Abb. 2.13](#)). Die Verwendung von Regressionsgeraden ist jedoch nur bedingt geeignet um verschiedene Messmethoden miteinander zu vergleichen [[Bland&Altman 1986](#)]. Aus diesem Grunde wurden zusätzlich sogen. Bland-Altman Plots angefertigt, die einen guten qualitativen Vergleich der Methoden liefern, jedoch nicht zur schließenden Hypothesenprüfung beitragen.

6.2 Ergebnisse

6.2.1 Ergebnisse zur Genauigkeit am apikalen Referenzpunkt

In aktuellen Studien zur Genauigkeit von Endometriegeräten wird zumeist der Prozentsatz von Messungen im Bereich $\pm 0,5$ mm um den Referenzpunkt angegeben. Als Referenzpunkte werden zumeist das Foramen apicale oder die apikale Konstriktion verwendet. **Tab. 6.1** zeigt eine Auswahl der Ergebnisse von aktuellen Studien mit dem Foramen apicale als Referenzpunkt im Vergleich zur vorliegenden Studie. Hier zeigen sich sehr gute Ergebnisse für das Gerät Root ZX bzw. Dentaport ZX. Die Messgenauigkeit des Gerätes Elements Diagnostic Unit wird hier leicht reduziert angegeben.

Studie	Jahr	Gerät	File	Genauigkeit
Guise et al.	2009	Root ZX	10	97,5%
Guise et al.	2009	Elements	10	90%
Lucena-Martin et al.	2004	Root ZX	15	85%*
Shabahang	1996	Root ZX	15	96,2%
Aktuelle Studie	2010	Dentaport ZX	10/15	97,4 / 97,6 %
Aktuelle Studie	2010	Root ZX mini	10/15	95 / 93,4 %
Aktuelle Studie	2010	Elements	10/15	86,2 / 84,8 %
Aktuelle Studie	2010	Raypex 5	10/15	82,4 / 87,2 %

Tab. 6.1: Genauigkeit von verschiedenen Endometriegeräten bei Lokalisation des Foramen apicale in unterschiedlichen Studien. Angegeben wird der Prozentsatz der Messungen im Intervall $\pm 0,5$ mm um das Foramen apicale. * bedeutet, dass die absolute Genauigkeit angegeben wird.

Tab. 6.2 zeigt eine Auswahl der Ergebnisse von aktuellen Studien mit der apikalen Konstriktion als Referenzpunkt. Hier sind in den meisten Studien deutlich geringere Prozentwerte für die Genauigkeit ausgewiesen.

In der vorliegenden Studie zeigten sich gute Messgenauigkeiten am Foramen apicale für alle Geräte und mit beiden Messelektroden. Eine leicht erhöhte Messgenauigkeit für die Geräte auf Basis des Root ZX zeigt sich hier als Trend entsprechend den Angaben aus der aktuellen Literatur.

Studie	Jahr	Gerät	File	Genauigkeit
Briseno-Marroquin	2008	Elements	08	36,99%*
			10	39,04%*
			15	44,93%*
Briseno-Marroquin	2008	Raypex 5	08	42,76%*
			10	39,31%*
			15	39,06%*
Janolio de Camargo	2009	Root ZX	15 (preflared)	75%* 97,5%
Janolio de Camargo	2009	Elements	15 (preflared)	55%* 95%
Haffner et al.	2005	Root ZX	15	78%
Hör et al.	2005	Raypex 4	MN xxf	94.8§
Pascon et al.	2009	Dentaport ZX	15	39% 90%\$
Pascon et al.	2009	Raypex 5	15	31% 82%\$
Pascon et al.	2009	Elements	15	37% 73%\$
Plotino et al.	2006	Root ZX	15	97,37%
Plotino et al.	2006	Elements	15	94,28%
Siu et al.	2009	Root ZX	Profile 40-20	50%
Tselnik et al.	2005	Root ZX	?	75%
Tselnik et al.	2005	Elements	?	75%
Versiani et al.	2009	Root ZX	20	83,78-90,5%
Welk et al.	2003	Root ZX	?	90,7%
Wrbas et al.	2006	Root ZX	15	75%
Wrbas et al.	2006	Raypex 5	15	80%

Tab. 6.2: Genauigkeit von verschiedenen Endometriegeräten bei Lokalisation der apikalen Konstriktion in unterschiedlichen Studien. Angegeben wird der Prozentsatz der Messungen im Intervall +/- 0,5 mm um das Foramen apicale. * bedeutet, dass die absolute Genauigkeit angegeben wird. \$ bedeutet, dass das Zielintervall auf +/- 1 mm erweitert wurde, § bedeutet, dass das Intervall Foramenapicale/apikale Konstriktion zur Bestimmung verwendet wurde.

6.2.2 Ergebnisse im Bereich koronal des Referenzpunkts

Außerhalb des Bereiches um den Apex hängt die Messgenauigkeit von dem Verlauf der Messkurve, von Art und Prinzip des Anzeigedisplays [Hör et al. 2005] und von der Entfernung der Meßelektrode zum Apex ab [Venturi & Breschi 2007, Higa et al. 2009]. Die Meßkurve für Endometer ab der dritten Generation ist sigmoidal [Voß 1993] und nur in einem engen Bereich von wenigen Millimeter um das Foramen apicale annähernd linear. Dementsprechend schwierig ist es, die Distanz einer Messelektrode zum Foramen apicale genau zu bestimmen [Venturi & Breschi 2007].

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass Linearität und Steigung der Messkurven vom untersuchten Messgerät abhängt. Das berechnete r^2 für die hier untersuchten Geräte zeigt eine gute Linearität für Dentaport ZX (0,6-0,75) und Root ZX mini (0,53-0,66), sowie moderate Linearität für Elements Diagnostic Unit (0,42-0,43) und Raypex 5 (0,32-0,36).

Die Skalen der untersuchten Geräte zeigen entweder eine Skala der apexnahen 3 mm an (Dentaport ZX, Root ZX mini, Elements Diagnostic Unit), oder eine stark aufgespreizte Farbskala ohne Entfernungsangabe (Raypex 5). Bei Raypex 5 zeigt die Messkurve (Abb. 5.4) eine zu niedrige Steigung (0.37-0.57), die Interpretation der Anzeigewerte als Entfernung zum Apex ist also irreführend. Die Messkurve für Dentaport ZX hat eine optimale Steigung (1.01-1.05) mit niedrigen Standardabweichungen für die einzelnen Positionen (Abb. 5.1 und 5.9). Dementsprechend können die Displayanzeigen durchaus im Bereich von 0-3mm koronal des Foramen apicale als Entfernungsangaben in Millimeter betrachtet werden. Hierbei sollte jedoch stets beachtet werden, dass sich die höchste Messgenauigkeit am Foramen apicale ergibt. Die Geräte Root ZX mini und Elements Diagnostic Unit haben niedrigere Steigungen und insbesondere das Gerät Elements Diagnostic Unit hat deutlich höhere Standardabweichungen an den verschiedenen Messpunkten.

6.2.3 Vergleich der unterschiedlichen Messelektroden.

Ein direkter Einfluss des Elektrodendurchmessers konnte in der aktuellen Studie nicht gefunden werden. Dies entspricht den Ergebnissen aus der Literatur [Nguyen et al. 1996]. Lediglich beim Gerät Dentaport ZX zeigte sich eine leicht höhere Messgenauigkeit für die Feile ISO 15 im Bereich 0-1.5 mm koronal des Foramen apicale.

7 Klinische Schlussfolgerung

Alle untersuchten Endometer konnten das Foramen apicale mit akzeptabler Messgenauigkeit bestimmen. In den ersten drei Millimeter koronal des Foramen apicale hängen Linearität und Messgenauigkeit vom untersuchten Gerät ab. Das Gerät mit der besten Übereinstimmung zwischen Ablesewert und Elektrodenposition war hier das Dentaport ZX. Leicht geringere Linearitäts- und Streuungswerte zeigen die Geräte Root ZX mini und Elements Obturation Unit. Die Interpretation der Farbzonen des Raypex 5 als Distanzwerte ist nicht zu empfehlen.

Einen Effekt der Feilengröße konnte prinzipiell nicht festgestellt werden. Lediglich beim Gerät Dentaport ZX wurde für den Bereich 0-1.5 mm koronal des Foramen apicale eine höhere Messgenauigkeit für das Instrument mit der ISO-Größe #15 gefunden.

8 Zusammenfassungen

8.1 Zusammenfassung (vierseitig)

8.1.1 Problematik und Ziel der Studie

Ziel einer endodontischen Behandlung ist es, das Wurzelkanalsystem eines erkrankten Zahnes instrumentell zu reinigen und zu erweitern, es zu desinfizieren und mit einer festen Wurzelkanalfüllung zu verschließen [ESE 1994]. Die Erfolgsrate dieser Behandlung ist neben anderen Faktoren wesentlich von der Beachtung und Festlegung der sog. Arbeitslänge abhängig. Für die Bestimmung der Arbeitslänge ist insbesondere die Lage des apikalen Foramens von Bedeutung. Mit der klassischen Röntgenmesstechnik ist dieses nicht lokalisierbar, es werden daher seit ca. 50 Jahren auch elektronische Geräte zur Lokalisation eingesetzt, welche die Position des Foramens durch eine elektrische Widerstandsmessung bestimmen.

Zur Messgenauigkeit dieser Systeme gibt es seit Einführung eine hohe Zahl von Studien [Gordon&Chandler 2004], die jedoch üblicherweise die Messgenauigkeit direkt am Foramen apicale bestimmen. Die Messelektronik der Geräte arbeitet in der Regel das Messergebnis so auf, dass eine Funktion des Elektrodenabstands zum Foramen apicale erzeugt wird und dies auch auf der Anzeigeskala sichtbar wird. Viele Geräte sind daher mit einer Skala versehen, die einen Abstand vom Foramen apicale darstellt. Da es klinisch nicht immer möglich ist, den Apex mit der Messelektrode zu erreichen und ggf. dies, z.B. bei hoher bakterieller Belastung, auch nicht wünschenswert ist, wäre interessant, ob den Ergebnissen der Endometer auch jenseits des apikalen Zielpunktes vertraut werden kann. Ziel der vorliegenden Studie ist es daher, die Messgenauigkeit von vier Endometern in der Region 0-3 mm koronal vom Foramen apicale hinsichtlich der Übereinstimmung von Feilenposition und Displayanzeige zu bestimmen.

8.1.2 Material und Methode

Zwanzig frisch extrahierte einwurzlige Zähne mit rundem Wurzelkanalquerschnitt wurden ausgewählt und ihre Kronenanteile abgesägt. Die Kanaleingänge wurden erweitert und die Länge der Kanäle bis zum Foramen apicale auflichtmikroskopisch durch einen Experten

bestimmt. Anschließend wurde die gewonnene Arbeitslänge röntgenologisch in zwei Ebenen verifiziert.

Die Kanäle wurden anschließend von Gewebsresten befreit, desinfiziert und so aufbereitet, dass ein endodontisches Instrument der Größe ISO 15 passgenau im Kanal positioniert werden konnte und ein Instrument der Größe ISO 10 locker im Kanal liegt. Die Wurzeln wurden dann in einem Plexiglasrohr so eingebaut, dass die Wurzelspitzen in eine physiologische Kochsalzlösung eingetaucht werden konnte.

Die Kanallänge wurde nunmehr mit vier Endometern (Dentaport ZX, Root ZX mini, Elements Diagnostic Unit und Raypex 5) in Abständen von 0,5 mm zwischen Foramen apicale und einem Bereich 3mm distal hiervon bestimmt. In der ersten Versuchsserie wurden die Positionen der Messelektroden auf die betreffenden Abstandswerte eingestellt und die Skalenwerte der Geräte abgelesen. Anschließend wurde die Messung wiederholt, wobei die entsprechenden Skalenwerte angesteuert wurden und die Abstandswerte der Elektrodenspitze zum wahren Referenzpunkt gemessen und notiert wurden. Nicht ablesbare Werte oder solche, die eine stark springende Anzeige verursachten wurden als fehlende Werte eingetragen.

Die Messungen wurden zunächst mit einem Instrument der Größe ISO10 und dann mit dem Instrument ISO15 durchgeführt. Die Messdaten wurden als Messfunktionen mittels linearer Regression ausgewertet, sowie als Blandt-Altman Plot dargestellt. Da weder Normalverteilung, noch Varianzhomogenität nachgewiesen werden konnte, wurden nichtparametrische Tests zur Hypothesenprüfung auf einem Signifikanzniveau von $\alpha=0.05$ herangezogen.

8.1.3 Ergebnisse

Das Foramen apicale wurde von allen vier Geräten mit guter Genauigkeit bestimmt. Eine Messelektrode direkt am Foramen apicale lieferte Ablesewerte zwischen 0.01 und 0.38 mm. In einem Intervall von $\pm 0,5$ mm um den Referenzpunkt (Foramen apicale) konnten so zwischen 82,4% (ISO 10) / 87,2% (ISO 15) korrekte Messungen (Raypex 5), 86,2% / 84,8% korrekte Messungen (Elements Diagnostic Unit), 95% / 93,4% korrekte Messungen (Root ZX mini) und 97,4% / 97,6% korrekte Messungen (Dentaport ZX) bestimmt werden. Für das Gerät Dentaport ZX wurde bei Verwendung des Instruments ISO15 eine leicht bessere Messgenauigkeit im Bereich zwischen 0-1,5 mm festgestellt, ansonsten wurde kein Einfluss der verwendeten Messfeile festgestellt (Abb. 8.1).

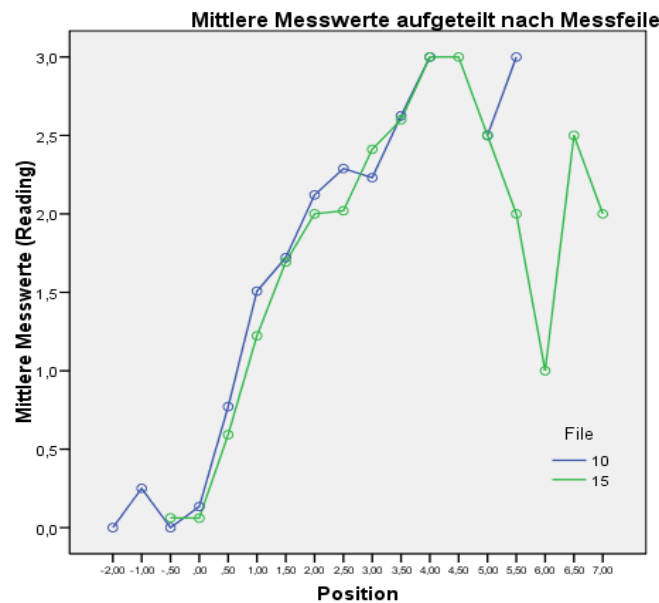


Abb. 8.1: Mittlere Messwerte in Abhängigkeit der Eindringposition aufgeteilt nach Messfeilendurchmesser. Beide Kurven überlappen für einen Bereich von -0.5 bis 4.0 mm um den apikalen Referenzpunkt.

Die lineare Regression zeigt eine gute Linearität der Messfunktion für Dentaport ZX und Root ZX mini und eine moderate für Elements Diagnostic Unit und Raypex 5. Für letzteres Gerät ist die Steigung der Messfunktion zu niedrig (0.37-0.57) während diese für Dentaport ZX (1.01-1.05) fast optimal ist. Das Root ZX mini und das Elements Obturation Unit zeigen eine geringere Steigung und speziell das Elements Obturation Unit hohe Streuungswerte an den einzelnen Messpositionen. Der lineare Bereich der ansonsten sigmoidalen Kurven ist in Abhängigkeit des Gerätes unterschiedlich lang (Abb. 8.1).

8.1.4 Diskussion und klinische Relevanz

Die Messgenauigkeit der geprüften Geräte liegt im Bereich der Literaturangaben, mit allen Geräten kann das Foramen apicale relativ sicher lokalisiert werden. Hinsichtlich der Genauigkeit in den letzten 3 mm vor dem Foramen apicale zeigen Dentaport ZX und Root ZX mini die beste Übereinstimmung zwischen Elektrodenposition und Anzeigewert. Beim Raypex 5 führt eine Interpretation der farblich codierten Ablese skala als Distanzwert zu fehlerhaften Interpretationen.

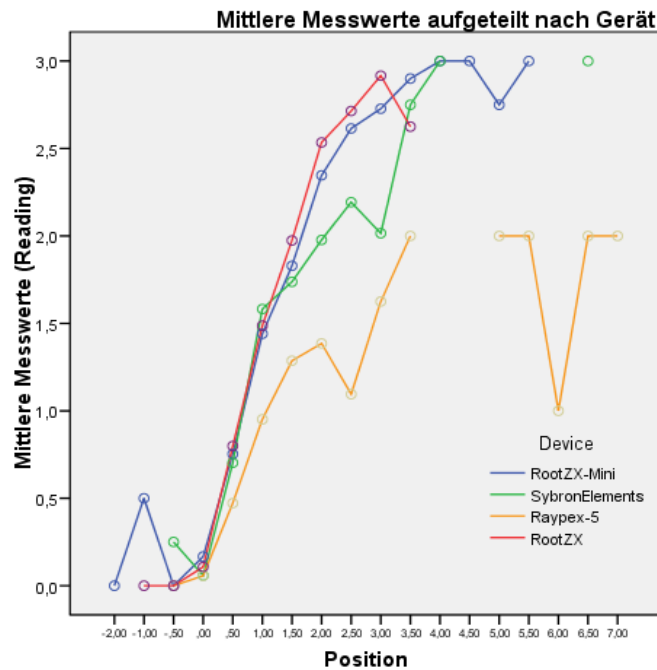


Abb. 8.2: Mittlere Messwerte in Abhängigkeit der Eindringposition aufgeteilt nach Messgeräten. Die Kurven von Root ZX mini und Dentaport ZX überlappen in einem Bereich von -0,5 bis ca. 3.0 mm. Die Elements Diagnostic Unit weicht bereits ab einem Wert von 1,5 mm ab und die Kurve von Raypex 5 zeigt einen völlig anderen Verlauf.

8.2 Zusammenfassung (einseitig)

Ziel der Studie: Bestimmung der Genauigkeit von vier Endometern in der Region 0-3 mm koronal vom Foramen apicale hinsichtlich der Übereinstimmung von Feilenposition und Displayanzeige.

Methode: Zwanzig frisch extrahierte einwurzlige Zähne mit rundem Wurzelkanalquerschnitt wurden ausgewählt und ihre Kronenanteile abgesägt. Die Kanaleingänge wurden erweitert und die Länge der Kanäle bis zum Foramen apicale auflichtmikroskopisch durch einen Experten bestimmt. Die Kanäle wurden anschließend so aufbereitet, dass ein endodontisches Instrument der Größe ISO 15 passgenau im Kanal positioniert werden konnte und ein Instrument der Größe ISO 10 locker im Kanal liegt. Die Wurzeln wurden dann in einem Plexiglasrohr so eingebaut, dass die Wurzelspitzen in eine physiologische Kochsalzlösung eingetaucht werden konnte. Die Kanallänge wurde nunmehr mit vier Endometern (Dentaport ZX, Root ZX mini, Elements Diagnostic Unit und Raypex 5) in Abständen von 0,5 mm zwischen Foramen apicale und einem Bereich 3mm distal hiervon bestimmt. Die Messungen wurden zunächst mit einem Instrument der Größe ISO10 und dann mit dem Instrument ISO15 durchgeführt. Die Messdaten wurden als Messfunktionen mittels linearer Regression ausgewertet, sowie als Blandt-Altman Plot dargestellt. Nichtparametrische Tests wurden zur Hypothesenprüfung auf einem Signifikanzniveau von $\alpha=0.05$ herangezogen.

Ergebnisse: Das Foramen apicale wurde von allen vier Geräten mit guter Genauigkeit bestimmt. Eine Messelektrode direkt am Foramen apicale lieferte Ablesewerte zwischen 0.01 und 0.38 mm. Für das Gerät Dentaport ZX wurde bei Verwendung des Instruments ISO15 eine leicht bessere Messgenauigkeit im Bereich zwischen 0-1,5 mm festgestellt. Die lineare Regression zeigt eine gute Linearität der Messfunktion für Dentaport ZX und Root ZX mini und eine moderate für Elements Diagnostic Unit und Raypex 5. Für letzteres Gerät ist die Steigung der Messfunktion zu niedrig (0.37-0.57) während diese für Dentaport ZX (1.01-1.05) fast optimal ist. Das Root ZX mini und das Elements Obturation Unit zeigen eine geringere Steigung und speziell das Elements Obturation Unit hohe Streuungswerte an den einzelnen Messpositionen.

Diskussion: Dentaport ZX und Root ZX mini zeigen die beste Übereinstimmung zwischen Elektrodenposition und Anzeigewert. Beim Raypex 5 führt eine Interpretation der farblich codierten Ablese skala als Distanzwert zu fehlerhaften Interpretationen.

8.3 Zusammenfassung (einseitig, englisch)

Aim: To evaluate the accuracy of four electronic apex locators in the apical region (0-3 mm short of the foramen) and to compare precision of the readings on the display with the real file position in the root canal.

Methodology: Twenty single rooted extracted teeth with round root canals were used. The canal orifices were preflared and the length to the major foramen was determined visually under a microscope. Canals were enlarged, so that a size 15 file was well fitting inside the canal. Teeth were mounted in acrylic test tubes filled with physiologic saline solution. Electronic length was determined in the region between the major foramen and 3 mm short of it in 0.5 mm steps with the Dentaport ZX, Root ZX mini, Elements Diagnostic Unit and Apex Locator and Raypex 5 using files of size 10 and size 15. The data was analysed using linear regression between true length and EAL reading, Bland-Altman plots and nonparametric tests at a significance level of $\alpha=0.05$.

Results: The major foramen was detected by all EALs. With a measurement file positioned directly at the major foramen, meter readings were equivalent to a position 0.01 to 0.38 mm away. For the Dentaport ZX, a better accuracy using the size 15 file for the area 0-1.5 mm short of the apex was found. The differences in measurements between the two files were smaller for the other EALs. In linear regression, a good linearity for Dentaport ZX and Root ZX mini and moderate linearity for Elements Diagnostic Unit and Apex Locator and Raypex 5 were found. The slope of the measurement curve was too low (0.37-0.57) for the Raypex 5 and almost optimal for the Dentaport ZX (1.01-1.05). The Root ZX mini and the Elements Obturation Unit produced lower slope values and especially the Elements Obturation Unit revealed much higher SDs at the different measurement levels.

Conclusion: Among the four EALs, the Dentaport ZX and Root ZX mini had the best agreement between true lengths and meter readings. For the Raypex 5 an interpretation of the colour coded zones as distance to the foramen cannot be recommended and may lead to erroneous interpretations.

9 Literaturverzeichnis

- 1 Bland MJ, Altman DG
Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement.
The Lancet 8, 307-310 (1986).
- 2 Briseño-Marroquín B, Frajlich S, Goldberg F, Willershausen B
Influence of instrument size on the accuracy of different apex locators: an in vivo study.
J Endod 34, 698-702 (2008).
- 3 Brunton PA, Abdeen D, Macfarlane TV
The effect of an apex locator on exposure to radiation during endodontic therapy.
J Endod 28, 524-526 (2002).
- 4 Burch JG, Hulen S
The relationship of the apical foramen to the anatomic apex of the tooth root.
Oral Surg Oral Med Oral Pathol 34, 262-268 (1972).
- 5 Castellucci A
Endodontics Vol. 1
Tridente, Florenz, 2003.
- 6 Certosimo FJ, Milos MF, Walker T
Endodontic working length determination - where does it end ?
Gen Dent 47, 281-286 (1999).
- 7 Cruse WP, Belizzi R
A historic review of Endodontics 1689-1963, part 2.
J. Endod 6, 532-548 (1980).
- 8 Custer C
Exact methods for locating the apical foramen.
J Nat Dent Assoc 5, 815-819 (1918).

- 9 Dummer PMH, McGinn JH, Rees DG
The position and topography of the apical canal constriction and apical foramen.
IntEndod J 17, 192-198 (1984).
- 10 Dunlap CA, Remeikis NA, BeGole EA, Rauschenberger CR
An In Vivo Evaluation of an Electronic Apex Locator that Uses the Ratio Method in
vital and Necrotic Canals.
J Endod 24, 48-50 (1998).
- 11 Ebrahim AK, Wadachi R, Suda H
Electronic Apex Locators - A Review.
J Med Dent Sci 54, 125-136 (2007).
- 12 Europäische Gesellschaft für Endodontologie
Qualitätsrichtlinien endodontischer Behandlung.
Endodontie 4, 56-61 (1994).
- 13 Frank AL, Torabinejad M
An In Vivo Evaluation of Endex Electronic Apex Locator.
J Endod 19, 177-179 (1993).
- 14 Goldberg F, Frajlich S, Kuttler S, Manzur E, Briseño-Marroquín B
The evaluation of four electronic apex locators in teeth with simulated horizontal
oblique root fractures.
J Endod 34, 1497-1499 (2008).
- 15 Gordon E
An instrument for measuring the length of root canals.
Dent Pract 3, 86- (1960).
- 16 Gordon MPJ, Chandler NP
Electronic Apex locators.
IntEndod J 37, 425-437 (2004).
- 17 Guise GM, Goodell GG, Imamura GM
In vitro comparison of three electronic apexlocators.
Journal of Endodontics (2009); 10.1016/j.joen.2009.09.016 (EPub ahead of print).

- 18 Guldener PHA, Imobersteg C
Neue Methode zur exakten Längenbestimmung von Wurzelkanalinstrumenten.
Schweiz MschrZahnheilk 82, 280 (1972).
- 19 Guldener PHA, Langeland K
Endodontologie – Diagnostik und Therapie.
Thieme Verlag, Stuttgart ,1993.
- 20 Haffner C, Folwaczny M, Galler K, Hickel R
Accuracy of electronic apex locators in comparison to actual length – an in vivo study.
J Dent 33, 619-625 (2005).
- 21 Hellwig, E., Klimek, J., Attin, Th.
Einführung in die Zahnerhaltung.
Urban&Fischer München, 1999.
- 22 Herrera M, Abalos C, Planas AJ, Llamas R
Influence of apical constriction diameter on Root ZX apex locator precision.
J Endod 33, 995-998 (2007).
- 23 Higa RA, Adorno CG, Ebrahim AK, Suda H
Distance from file tip to the major apical foramen in relation to the numeric meter
reading on the display of three different electronic apex locators.
IntEndod J 42,1065-1070 (2009).
- 24 Hör D, Attin T
Die elektrische Längenbestimmung des Wurzelkanals.
Endodontie 1, 39-56 (2001).
- 25 Hör D, Krusy S, Attin T
Ex vivo comparison of two electronic apex locators with different scales and
frequencies.
IntEndod J 38, 855-859 (2005).
- 26 Huang L
An experimental study of the principle of electronic root canal measurement.
J Endod 13, 60- (1987).

- 27 Hülsmann M
Endodontie.
Thieme Verlag, Stuttgart, 1993.
- 28 Hülsmann M, Rödiger T
Die Röntgenmessaufnahme.
Endodontie 10, 21-37 (2001).
- 29 Hülsmann M, Pieper K
The use of an electronic apex locator in the treatment of teeth with incomplete root formation.
Endod Dent Traumatol 5, 238-241 (1989).
- 30 Ingle JI
Endodontic instruments and instrumentation.
Dent Clin North Am 1, 805 (1957).
- 31 Ingle JI, Bakland LK
Endodontics. 5th Edtn.
BC Decker Inc, London, 2002.
- 32 Ibarrola JL, Chapman BL, Howard JH, Knowles KI, Ludlow MO
Effect of preflaring on Root ZX apex locators.
J Endod 25, 625-626 (1999).
- 33 Janolio de Camargo E, Zapata RO, Medeiros PL, Bramante CM, Bernardineli N, Garcia RB, Gomes de Moraes I, Duarte MAH
Influence of preflaring on the accuracy of length determination with four electronic apex locators.
J Endod 35, 1300-1302 (2009).
- 34 Jenkins JA, Walker WA, Schindler WG, Flores CM
An in vitro evaluation of the accuracy of the Root ZX in the presence of various irrigants.
J Endod 27, 209-11 (2001).

- 35 Kim E, Marmo M, Lee C-Y, Oh N-S, Kim I-K
An in vivo comparison of working length determination by only root ZX apex locator versus combining root ZX apex locator with radiographs using a new impression technique.
Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 105, e79-e83 (2008).
- 36 Kobayashi C, Suda H
New Electronic Canal Measuring Device Based on the Ratio Method.
J Endod 20, 111-114, (1994).
- 37 Kobayashi C
Electronic canal length measurement.
Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 79, 226-231 (1995).
- 38 Kovacevic M, Tamarut T
Influence of the Concentration of Ions and Foramen Diameter on the Accuracy of Electronic Root Canal Length Measurement – An Experimental Study.
J Endod 24, 346-351 (1998).
- 39 Kuttler Y
Microscopic investigation of root apices.
J Am Dent Assoc 50, 544-552 (1955).
- 40 Maschinski G
Lexikon Zahnmedizin, Zahntechnik.
Urban & Fischer, Elsevier, Berlin, 2000.
- 41 Mayeda DL, Simon JHS, Aimar DF, Finley K
In Vivo Measurement Accuracy in Vital and Necrotic Canals with the Endex Apex Locator.
J Endod 19, 545-548, (1993).
- 42 McDonald NJ
The Electronic Determination of Working Length.
Dental Clinics of North America 36, 293-307 (1992).

- 43 Nekoofar MH, Ghandi MM, Hayes SJ, Dummer PMH
The fundamental operating principles of electronic root canal length measuring devices.
Int Endod J 39, 595-609 (2006).
- 44 Nguyen HG, Kaufman AY, Komorowski RC, Friedman S
Electronic length measurement using small and large files in enlarged canals.
IntEndod J 29, 359-364 (1996).
- 45 Olson AK, Goerig AC, Cavataio RE, Luciano J
The ability of the radiograph to determine the location of the apical foramen.
Intern Endo J 24, 28-35 (1994).
- 46 Özsezer E, Inan U, Aydin U
In Vivo Evaluation of ProPex Electronic Apex Locator.
J Endod 33, 974-977 (2007).
- 47 Pascon EA, Marrelli M, Congi O, Ciancio R, Miceli F, Versiani MA
An ex vivo comparison of working length determination by 3 electronic apex locators.
Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral RadiolEndod108, e147-e151 (2009).
- 48 Plotino G, Grande NM, Brigante L, Lesti B, Somma F
Ex vivo accuracy of three electronic apex locators: Root ZX, Elements Diagnostic Unit and Apex Locator and ProPex.
IntEndod J 39, 408-414 (2006).
- 49 Ponce EH, Fernandez JAV
The Cemento-Dentinal-Canal Junction, the apical foramen, and the apical constriction: Evaluation by optical microscopy.
J Endod 29, 214-219 (2003).
- 50 Ricucci D
Apical limit of root canal instrumentation and obturation, part 1: Literature review.
IntEndod J 31, 384-393 (1998).

- 51 Schilder, H.
Cleaning and Shaping the Root Canal.
Dent Clin N Am 18, 269-296 (1974).
- 52 Seidberg BH, Alibrandi BV, Fine V, Logue B
Clinical investigation of measuring working length of root canals with an electronic device and with digital-tactile sense.
J Am Dent Assoc 90, 379-387 (1975).
- 53 Shabahang S, Goon WW, Gluskin AH
An in vivo evaluation of Root ZX electronic apex locator.
J Endod 22, 616-618 (1996).
- 54 Siu C, Marshall JG, Baumgartner JC
An In Vivo Comparison of the Root ZX-II, the Apex NRG XFR, and Mini Apex Locator by Using Rotary Nickel-Titanium Files.
J Endod 35, 962-965 (2009).
- 55 Stock CJR, Gulabivala K, Walker RT, Godman JR
Endodontics.
Mosby Inc., 2nd Edition, 101-224, (1997).
- 56 Stoll R, Sonntag D, Stachniss V
Digitale Radiographie als Hilfsmittel zur Bestimmung der Arbeitslänge.
Endodontie 1, 59-71 (2001).
- 57 Stoll R, Betke K, Stachniss V
The influence of different factors on the success of root canal fillings – a ten-year retrospective study.
J Endod 31, 783-790 (2005).
- 58 Stoll R
Endodontie im Jahre 2008: Neue und alte Trends.
ZahnärztlPrax 11, 174-178 (2008).

- 59 Stoll M
Evaluation eines neuen Modells zur In-vitro Testung von Endometriegegeräten.
Med. Diss., Freiburg, 2007.
- 60 Sunada I
New method for measuring the length of the root canal.
Journal of dental research 41, 375-387 (1962).
- 61 Suzuki K
Experimental study on iontophoresis.
J Jap Stomat 16, 411-417 (1942).
- 62 Thomas AS, Hartwell GR, Moon PC
The accuracy of the Root ZX electronic apex locator using stainless-steel and nickel-titaniumfiles.
J Endod 29, 662-663 (2003).
- 63 Tidmarsh BG, Sherson W, Stalker NL
Establishing endodontic working length: A comparison of radiographic and electronic methods.
New Zealand Dent J 81, 93-96 (1985).
- 64 Tselnik M, Baumgartner JC, Marshall JG
An Evaluation of Root ZX and Elements Diagnostic Apex Locator.
J Endod 31, 507-509 (2005).
- 65 VDW
Raypex 5 – User Manual.
VDW, München 2005.
- 66 Venturi M, Breschi L
A comparison between two electronic apex locators: an in vivo investigation.
IntEndod J 38, 36-45 (2005).
- 67 Venturi M, Breschi L
A comparison between two electronic apex locators: an ex vivo investigation.
IntEndod J 40, 362-373 (2007).

- 68 Versiani MA, Santana BP, Caram CM, Pascon EA, Alves de Souza CJ, Biffi JCG
Ex vivo comparison of the accuracy of Root ZX II in detecting apical constriction
using different meter's reading.
Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 108, e41-e45 (2009).
- 69 Visser H, Kramer I, Hülsmann M, Krüger W
Physikalische charakterisierung von Endometriegeräten.
ZWR 100, 458-460 (1991).
- 70 Voß A
Die Endometrie - eine fragwürdige Methode der Längenbestimmung des
Wurzelkanals.
Dtsch Zahnärztl Z 44, 606-609 (1989).
- 71 Voß A
Neue elektrische Meßverfahren zur Längenbestimmung des Wurzelkanals.
Dtsch Zahnärztl Z 45, 219-222 (1990).
- 72 Voß A
Die Wurzelkanallängenbestimmung - Röntgenologisch und/oder endometrisch.
In: Endodontie - Neue Erkenntnisse aus Praxis und Wissenschaft.
Hanser Verlag, München (1993).
- 73 Voß A, Siebenkees J
Experimentelle und klinische Bewertung der Endometriegeräte Apit und Root ZX.
Dtsch Zahnärztl Z 49, 281-284 (1994).
- 74 Welk AR, Baumgartner JC, Marshall JG
An In Vivo Comparison of two Frequency-based Electronic Apex Locators.
J Endod 29, 497-500 (2003).
- 75 Wrbas KT, Ziegler AA, Altenburger MJ, Schirrmeister JF
In vivo comparison of working length determination with two electronic apex locators.
IntEndod J 40, 133-138 (2007).

- 76 Zmener O, Grimberg F, Banegas G, Chiacchio L
Detection and measurement of endodontic root perforations using a newly designed
apex-locating handpiece.
EndodDentTraumatol 15, 182-185 (1999).

10 Materialverzeichnis

Produkt/Handelsname	Hersteller/Bezugsquelle
1) Physiologische Kochsalzlösung	B.Braun, Melsungen
2) Ultraschall Gerät Sonosoft	Kaltenbach&Voigt
3) Scaler S205S	HuFriedy
4) Skalpelli No. 11	Feather
5) K-Feile	VDW, München
6) EDTA Lösung 17%	Hausapotheke
7) Natriumhypochlorit Lsg. 3%	Hausapotheke
8) Endo-Spülkanülen nach Buquet	Vedifar, Belgien
9) Endo Meßlehre	VDW, München
10) Cyanoacrylat Kleber: Loctite 496	Loctite
11) Autopolymerisat Palapress	Heraeus-Kulzer, Hanau
12) Objektträger (Acrylat)	Milian International, Schweiz
13) Probenrohr Acrylat (d= 3cm)	Firma A.Krüger, Barsbüttel
14) SPSS 15.0	SPSS Inc., Chicago IN, USA

11 Danksagung

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Frankenberger für das Thema und die freundliche Betreuung, ebenso bei Herrn Prof. Stoll für die Hilfe bei den mir z.T. fremden Laborprozeduren in der Zahnheilkunde, für die freundlicherweise überlassenen klinischen Bilder und die englische Übersetzung des Abstracts.

Bei Herrn Prof. Strauch möchte ich mich für die statistische Beratung im Rahmen der biometrischen Doktorandenbetreuung herzlich bedanken. Weiterhin gilt mein Dank allen Mitarbeitern der Abteilung für Zahnerhaltung, die mir bei meiner Laborarbeit mit Rat und Materialien zur Seite standen.

12 Akademische Lehrer

Meine akademischen Lehrer waren die Damen und Herren:

Arnold, Aumüller, Barth, Basler, Baum, Bien, Boudriot, Christ, Daut, Eilers, Fruhstorfer, Gemsa, Gerdes, Geus, Gotzen, Griss, Grzeschik, Gudermann, Happle, Hasilik, Heeg, Hellinger, Hesse, Hinrichs, Höffken, Hofbauer, Hoffmann, Jungklas, Jones, Kern, Klenk, Kloose, Koolmann, Kretschmar, Krieg, Kroll, Lammel, Lang, Lennartz, Leppek, Lill, Löffler, Lorenz, Maisch, Mann, Moll, Moosdorf, Müller, Mutters, Neubauer, Oertel, Renz, Riera, Röhm, Rothmund, Schmidt, Seitz, Seyberth, Steiniger, Stiletto, Vogelmeier, Vohlhand, Voigt, Walter, Weihe, Werner, Westermann, Wilke.

13 Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre mich ehrenwörtlich, dass ich die dem Fachbereich Humanmedizin der Philipps-Universität Marburg zur Promotionsprüfung eingereichte Arbeit:

**Messgenauigkeit und Linearität der Messkurven verschiedener
Endometriergeräte im nahen Apexbereich.**

im Medizinischen Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde unter Leitung von Prof. Dr. R. Frankenberger und der Betreuung von Oberarzt Prof. Dr. R. Stoll ohne jegliche Hilfe selbst durchgeführt habe.

Ich habe bis dato an keinem anderen zahnmedizinischen Fachbereich eine wissenschaftliche Arbeit als Dissertation vorgelegt.

Marburg, den 15.05.2010